الصوت والصوت اللغوي

حيث يستحيل ربط جهازين عصبيين أحدهما بالأخر لتوصيل الأفكار فيما بينهما بطريقة مباشرة كان لا بد من اللجوء إلى وسائل الاتصال المختلفة والتي تشكل اللغة الإنسانية أبرز أشكالها وأهم مظاهرها على الإطلاق. وحيث أن الصوت هو مادة اللغة صارت دراسة علم الأصوات اللغوية phonetics تشكل مجالا رئيسيا من مجالات علم اللغة العام general linguistics، الذي يشمل أيضا علوم النحو syntax والصرف morphophenemics والمعاني semantics والبلاغة أو الأسلوب stylestics. وعلم الأصوات اللغوية بدوره يتفرع إلى ثلاث شعب تتقاطع مع تخصصات أخرى خارج مجال اللغة. هذه الشعب الثلاث هي الفرع الذي يدرس الخصائص المادية للصوت اللغوي كحدث فيزيائي، وهو فرع يجمع بين علم الفيزياء وعلم اللغة ويسمى علم انتقال أصوات اللغة acoustic phonetics، أي انتقال الموجات الصوتية وتشكلها وانتقالها عبر جزئيات الهواء؛ وهناك علم سماع الأصوات auditory phonetics، أي كيف يتم استقبال الصوت وإدراك أثره السمعي كحدث سيكولوجي، وهذا مرتبط بعلم النفس الإدراكي والذي يدخل فيه دراسة عمليات الإدراك والذاكرة واكتساب اللغة؛ وأخيرا هناك علم مخارج الأصوات articulatory phonetics، وهو ذلك الفرع الذي يدرس أصوات اللغة كحدث فسيولوجي، أي كيف يتحقق الصوت بتحريك عضلات النطق، ولذا فهو يجمع بين علم اللغة وعلم الفسيولوجيا. من يتعاطون مع الصوت اللغوي من الباحثين المعاصرين يفترضون لمن يريد متابعة نقاشاتهم واستيعاب المفاهيم والمصطلحات التي يستخدمونها في حديثهم عن الصوت اللغوي الإلمام بالحد الأدنى من أساسيات فيزياء الصوت والطبيعة الأَكُستيكية للأصوات وسلوكها بشكل عام لأن ما ينطبق على الأصوات في الطبيعة ينطبق على أصوات اللغة. فالأصوات اللغوية ما هي إلا حيز من أصوات الطبيعة اجتزأها الإنسان ليوظفها في حمل المعاني والدلالات. سوف نركز في هذا الفصل على الجانب الفيزيائي وكذلك الجانب السمعي ونرجئ الحديث عن الجانب الفسيولوجي وتحقيق الأصوات اللغوية إلى الفصل التالي.

فيزياء الصوت

ما أن يغادر اللفظ شفتي قائله حتى يتحول إلى حدث فيزيائي بحت تحكمه نفس القوانين الفيزيائية التي تحكم الأصوات الأخرى التي تصدر عن الآلات الموسيقية أو عن الطيور أو الطيارات أو أي مصدر آخر. الصوت هو المظهر المادي للغة لكن حدوث الصوت لا بد له من مصدر يهتز، والمصدر يحتاج إلى طاقة ميكانيكة محرِّكة تضغط عليه لتحمله على الاهتزاز. فلو أنك هويت بمطرقة صغيرة تحملها بيدك على إحدى شعبتي شوكة رنانة فإنك تنقل الطاقة الحركية من يدك إلى شعبة الشوكة التي تهتز بفعل هذه الطاقة فتستجيب ذرات الهواء من حولها لاهتزاز ذلك الجسم وتهتز معه، وبذلك يتم تحويل الطاقة الحركية إلى طاقة صوتية، أو ما يسمى phonation. كلما اتجهت شعبة الشوكة في اهتزازها إلى الخارج أحدثت ضغطا على ذرات الهواء المجاورة لها فتراصت واقتربت من بعضها البعض، وإذا عادت الشعبة وتراجعت إلى

الداخل جذبت إليها ذرات الهواء فخلخلتها وباعدت ما بينها. وهكذا تراوح جزيئات الهواء المجاورة للشوكة بين تخلخل وتضاغط تبعا لاهتزازات شعبة الشوكة إلى الداخل والخارج. وذرات الهواء بدورها تنقل هذه التخلخلات والتضاغطات إلى الذرات التي تليها وتلك إلى التي تليها حتى تُستهلك الطاقة الباعثة على هذا التخلخل والتضاغط وتتبدد بفعل ما تلاقيه من احتكاك ومقاومة أثناء تحريكها لجزيئات الهواء أثناء إنتاج الذبذبات المتلاحقة مما يؤدي إلى اضمحلال الصوت وتلاشيه.

شعبة الشوكة هي الجسم المتحرك، أو لنقل مصدر الاهتزازات، وذرات الهواء هي الوسط الناقل لهذه الاهتزازات من المصدر إلى جهاز السمع. فالصوت لا ينتقل في فراغ، فلا بد له من وسط ناقل. فلو أحضرت قمعا زجاجيا محكم الإغلاق لا يتسرب الهواء إلى داخله ووضعت داخله جرسا كهربائيا يرن باستمرار ثم بدأت بتفريغ القمع من الهواء تدريجيا فسوف تلاحظ أن صوت الجرس يخفت ويتضاءل تدريجيا حتى يتلاشى تماما بعدما يتم تفريغ القمع من الهواء بالكامل. ولو أعدت الهواء مرة ثانية إلى القمع لتمكنت من سماع الجرس الذي انقطع عنك صوته.

جزيئات المادة، بما في ذلك الهواء المحيط بنا، في حركة دؤبة لا تنقطع، لكننا لا نحس بها سمعيا إلا إذا وصلت إلى درجة من القوة تتمكن بها من التأثير على طبلة الأذن لتهتز استجابة لذبذباتها. فيمكنك مثلا أن تحرك الهواء حواليك بالتلويح بيدك لكنك لن تسمع صوتا لأن يدك لا تصدر مقدارا كافيا من الطاقة لتحريك ذرات الهواء بالسرعة الكافية التي تهز طبلة الأذن. وأي مصدر اهتزاز في جزيئات الهواء هو مصدر صوتي لكن الأذن قد تسمعه وقد لا تسمعه اعتمادا على سرعة ذبذباته، فليست كل الاهتزازات قابلة لأن تلتقطها الأذن البشرية فمنها ما يقع دون ذلك وهي الموجات دون الصوتية infrasonic ومنها ما يقع فوق ذلك وهي الموجات فوق الصوتية ultrasonic. ولذلك فإن الدراسات الأَكُستيكية acoustics تحصر اهتمامها في دراسة الاهتزازات التي تقع ضمن حدود قدرة الأذن البشرية على سماعها. ونقطة البداية بالنسبة لقدرة الأذن البشرية على سماع الصوت هو ما يسمى عتبة السمع threshold of hearing. ويتراوح معدل الترددات التي تستطيع الأذن البشرية التقاطها من ٢٠ إلى ٢٠,٠٠٠ ترددا في الثانية. أما ما دون ذلك فليس له القدرة على تحريك طبلة الأذن وما فوقه تفوق سرعته قدرة الأذن على التردد. لكن الأذن أكثر قدرة على تمييز الأصوات ذات المعدل المتوسط التي تقع بين ٤٠٠ إلى ٥٠٠ ترددا في الثانية. ومعظم الترددات ذات الأهمية في تحليل الكلام تقع تحت ٨,٠٠٠ تردد في الثانية. وأسرع ترددات يستطيع جهاز التلفون نقلها لا تتعدى ٣,٥٠٠ ترددا في الثانية.

الهواء هو الوسيط المادي الذي تنقل جزيئاته الصوت الكلامي على شكل موجات تنبث في كل الاتجاهات وتعبر المسافة الفاصلة بين المتحدث وأي مستمع في مرمى الصوت، بما في ذلك المتحدث نفسه الذي يسمع صوت نفسه من خلال عمليات التغذية الاسترجاعية. والهواء مادة غازية جزيئاته من التناهي في الصغر بحيث يصل عددها في البوصة المكعبة إلى ٤٠٠ بليون بليون جزيء. ومعلوم أن جزيئات المادة الغازية لديها القابلية للتقارب والتباعد عن بعضها البعض، أو ما يسمى التضاغط compression والتخلخل rarefaction، إذا وقع عليها ضغط من قوة خارجية من جسم مهتز، أي أنها تتحرك ذهابا وإيابا تبعا لاهتزازات ذلك الجسم. فكل ذرة من ذرات الهواء تكون في وضع مستقر هو الوضع الذي تتخذه في حالة السكون، أو ما يسمى نقطة الصفر، والتي تمثل معدل الضغط الجوي. فإذا وقع عليها الضغط ابتعدت قليلا أو كثيرا عن مستقرها

وفقا لقوة الضغط الواقع عليها والذي يحدد مسافة ابتعادها عن المستقر لتعود راجعة إليه؛ وعند وصولها إليه تواصل حركتها إلى أقصى نقطة في الاتجاه المقابل لتعود منه مرة أخرى إلى نقطة المستقر point of rest. وتستمر على هذا المنوال حتى تتلاشى الطاقة الباعثة لها على الحركة تدريجيا فتتلاشى حركتها هي أيضا تبعا لذلك بالتدريج حتى تتوقف تماما. وكل جزيء من جزيئات الهواء الذي يتحرك بالطريقة المذكورة ينقل هذه الطاقة الحركية إلى الجزيئات التي بجواره والملامسة له فيدفعها إلى الاهتزاز بالطريقة ذاتها. وتسمى حركة الجسم من مستقره إلى أقصى بعد في اتجاه ما بالإزاحة displacement.

وحيث أن الصوت يتشكل على هيئة موجات تنتقل بسرعة عالية جدا تصل إلى ٣٤٠ مترا في الثانية فإنه قد يتهيأ لك أنك تسمعني في نفس اللحظة التي أتفوه بها بالكلام إلا أن هناك فترة زمنية فاصلة، وإن كانت ضئيلة جدا، بين النطق والسماع. ولأن سرعة الضوء أعلى من سرعة الصوت فأنت ترى وميض الانفجار قبل سماعك لصوت المدفع البعيد. وسرعة الصوت velocity هي سرعة انتشاره في الوسط الناقل، علما بأن هذه السرعة تحدث لها تغيرات طفيفة حسب تغير درجات الحرارة والرطوبة، ولذلك ينتقل الصوت في الليل البارد بسرعة أكبر من انتقاله في الضحى حينما تشتد الحرارة. والهواء ليس الوسط الوحيد القادر على نقل الصوت فأي وسط غازي أو سائل أو صلب جزيئاته لها خاصية المرونة elasticity قادر على التذبذب ومن ثم نقل الصوت. وكثافة الوسط الناقل له تأثير بالغ على سرعة الصوت، فهو اسرع انتقالا في المواد الصلبة يلي ذلك المواد السائلة وأخير المواد الغازية والهواء، ولذا نجدهم كانوا يضعون آذانهم على الأرض لسماع وقع حوافر الخيل على الأرض فيتنبهوا للغارة قبل حدوثها.

الوسط المادي المرن تتحرك جزيئاته إذا وقع عليها ضغط من قوة خارجية. وجزيئات الوسط سوف تقاوم الضغط وتنحو إلى استعادة وضعها الأصلي وفق مبدأ القصور الذاتي inertia الذي يعني ميل الجسم إلى استعادة وضعه الأصلي من حيث الثبات والحركة، فيظل الجسم الثابت ثابتا حتى يوجد ما يحركه والمتحرك متحركا حتى يوجد ما يوقف حركته، مثل مقاومة الوسط له أو اصطدامه بجسم آخر. لذا فإن أي جزيء من جزيئات الهواء المتحرك سوف يستمر في حركته إلى الأبد وفي نفس الاتجاه لو كان في محيط فارغ تماما من كل مقاومة مادية مضادة له. لكن ما يحدث هو أن الجزيء المتحرك سوف يصطدم بالجزيء المجاور له فيرتد إلى الجهة المعاكسة. فذرة الهواء تنزاح عن مستقرها التي هي عليه في حالة السكون في اتجاه محدد وخلال ذلك تبدأ في فقدان قوة الدفع وتتباطأ حركتها حتى تتوقف بعد أن تقطع مسافة معينة وترتطم بالذرة المجاورة لها. ارتطام الذرة الأولى بالذرة المجاورة لها قد يكون من القوة بحيث يزيد على مقاومة اندفاع الأولى ولا يقف تأثيره عند حد إيقاف حركتها فحسب بل يتعدى ذلك إلى ردها لتتحرك في الاتجاه المعاكس لترتد إلى مستقرها الذي كلما اقتربت منه ازدادت سرعتها واستجمعت قوة دفع جديدة momentum تمنحها الطاقة للاندفاع حتى إذا ما وصلت إلى نقطة المستقر اندفعت منها لتتعداها في الاتجاه المعاكس لترتطم بالذرة التي على الجهة المقابلة وتحركها بنفس الطريقة التي حركت بها تلك ثم تعود مرة أخرى إلى المستقر لتبدأ دورة تالية، وهكذا دواليك. وكل مرة تنزاح الذرة عن مستقرها تضغط على الذرة التي أمامها وتدفع بها إلى الأمام وهذه بدورها تدفع بالذرة المجاورة لها وهكذا مع بقية الذرات. وحينما تعود الذرة من أقصى نقطة إزاحة عائدة إلى مستقرها فإنها تتسبب في خلخلة تجذب معها الذرة المجاورة في اتجاه معاكس لاتجاهها الأول.

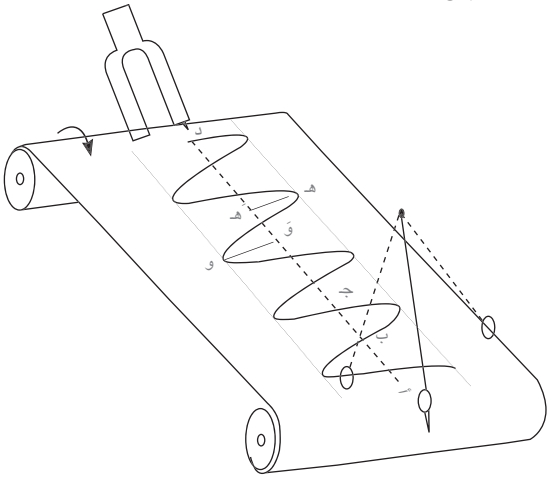
وهكذا عن طريق تضاغط ذرات الهواء وتخلخلها تنتقل هزات المصدر الصوتي من منشأها بعيدا وفي كل الاتجاهات على شكل موجات متتابعة حتى تُستنفد الطاقة التي نتجت عنها الحركة الأولى إلا إذا حدث ضغط إضافي pressure على مصدر الصوت ليحركه من جديد ويعوضه عما يفقده من الطاقة التي تتبدد بفعل المقاومة والاحتكاك. والتأثير الذي نتحدث عنه هنا لا يشمل ذرة واحدة ولا آلاف الذرات بل بلايين البلايين من الذرات المحيطة بمصدر الصوت وفي كل الاتجاهات. وانتقال الاهتزازات بهذه الطريقة هو ما نسميه الموجة الصوتية sound waves التي هي مجموعة الذبذبات المتعاقبة التي تنتج إحداها عن الأخرى حتى تصل إلى أذن السامع فتهتز طبلتها الرقيقة التي تتمتع بحساسية عالية فتنقل هذه الاهتزازات إلى مراكز السمع في الدماغ.

وتقوم ذرات الهواء بنقل الاهتزازات الناتجة عن مصدر الصوت ولكن دون انتقال الذرات نفسها، فهي لا تتعدى أماكنها وإنما تتحرك كل منها فقط حول نقطة مستقرها في اتجاهين متعاكسين بينما تتحرك الطاقة المحركة من ذرة لأخرى. ذرة الهواء ذاتها لا تغادر مكانها لتقطع المسافة الفاصلة من مصدر الصوت إلى الأذن بل إنها تظل تهتز كالأرجوحة أو البندول ذهابا وإيابا حول مستقرها في ذات المكان، لكنها تنقل الطاقة المحركة إلى ما جاورها من جزيئات هوائية فتدفعها إلى التقاط حركتها لتمررها بدورها إلى الجزيئات التالية لها بنفس الطريقة. إنها أشبه بصف طويل من العمال كل منهم يتناول الطوبة من العامل الذي على يمينه ليناولها للعامل الذي على يساره، وبهذه الطريقة ينتقل الطوب من مكان تجميعه إلى البَنّاء. فحينما يتحرك مصدر الصوت تنتقل حركته إلى ذرات الهواء الملامسة له وهذه تحرك الذرات الملامسة لها وتلك بدورها تحرك الذرات الملامسة لها حتى تتسع دائرة الموجة الصوتية بنفس الطريقة التي تتسع بها موجات الماء لو ألقيت حجرا في بركة ساكنة. فلا ذرات الهواء تغادر مكانها ولا ذرات الماء تغادر مكانها أثناء التموج، على خلاف تيار الريح أو تيار الماء النهري الذي ينقل كتل الهواء أو كتل الماء من مكان إلى مكان. "الموجة الصوتية ليست كالريح التي يتحرك بها مجموع جزيئات الهواء في اتجاه ما، كما أن الريح ليست شرطا ضروريا لانتشارها؛ إذ يمكن للموجة الصوتية أن تنتشر في عكس اتجاه الريح" (مصلوح ٢٠٠٠: ٢٣). لاحظ أنه لو كانت ذرات الماء المتموج تغادر مكانها لأدى ذلك إلى تفريغ البحر من مائه وانتقل الماء برمته إلى الجانب الآخر من الشاطئ. انظر مثلا إلى قارورة مقفلة وطافية على سطح الماء المتموج تجد أنها تتحرك مع حركة الأمواج لكنها لا تبرح مكانها. وجه الاختلاف بين موجات الهواء وموجات الماء أن ذرات الهواء المتموج تتحرك إلى الأمام وإلى الخلف بزاوية مستطيلة في نفس لاتجاه الذي يتخذه انتشار الموجة بينما ذرات الماء المتموجة تتحرك إلى أعلى وإلى أسفل بزاوية قائمة بالنسبة لاتجاه انتشار الموجة. لذلك ترى القارورة الطافية على سطح الماء المتموج تتحرك إلى أعلى وإلى أسفل. موجة الهواء موجة طولية longitudinal wave وموجة الماء موجة مستعرضة transeverse wave. مردّ هذا الفرق يعود إلى كون موجات الماء تنتشر بشكل دائري بينما تتحرك موجات الصوت في اتجاهات أفقية وعمودية على كل الأبعاد على هيئة دوائر كروية الشكل spherical متحدة في المركز ومتفاوتة في القطر والمحيط.

تحليل الموجات الصوتية

تحليل الموجات الصوتية ما هو إلا تحليل ذبذبات جزيئات الوسط الناقل للطاقة الحركية. ولكن كيف

يمكن تمثيل ذلك وتحويله من حدث سمعي إلى حدث مرئي؟ سرعة زوال الصوت وتلاشيه تجعل من دراسته أمرا صعبا. فأنت بمجرد تلفظك بالكلمة تؤذن بزاولها. ولذا نلجأ للرسوم البيانية لتوضيح خصائص الصوت بصريا، حيث يمكننا مثلا توضيح الذبذات وسرعتها واتساعها مستعينين بالخطوط والمنحنيات، سواء تلك الذبذبات الصادرة عن حركة البندول أو عن اهتزاز أحد طرفي الشوكة الرنانة مثلا. فتأرجح البندول وذبذبة شعبتي الشوكة يقومان على نفس المبدأ إلا أن حركة البندول لا تصل إلى السرعة التي تسمح لنا بسماعها ولا ذبذبة الشوكة من البطء بحيث نستطيع رؤيتها. ولتمثيل ذلك نقوم بتثبيت سن قلم رفيع على أحد شعبتي شوكة رنانة أو على بندول ونأتي بصفحة من الورق ونلفها حول اسطوانة يمكننا أن نحركها باتجاه واحد. ونموضع الشوكة أو البندول بشكل متعامد على صفحة من الورق وعلى هيئة تسمح بملامسة سن القلم للصفحة ملامسة خفيفة لا تحد من حركة الشوكة أو تعيقها لكنها تكفي لنقل اهتزازاتها على شكل خطوط على صفحة الورق. حينما تهتز الشوكة سيرسم القلم على الصفحة خطا يمتد طوله من أقصى نقطة يصل إليها اهتزاز ذراع الشوكة المتذبذب في اتجاه اليمين إلى أقصى نقطة يصل إليها في اتجاه اليسار وسوف يكون مستقره، أو ما سميناه نقطة الصفر، في وسط الخط تماما. وما ظلت الورقة ثابتة لا تتحرك فإن سن القلم سيتكرر مروره ذهابا وإيابا على الخط نفسه. أي أننا حددنا البعد المكاني فقط لتذبذبات طرف الشوكة. ولكي نضيف البعد الزمني لهذه الذبذبات وما يطرأ عليها من تغيرات لحظة بلحظة لا بد من تحريك الاسطوانة حركة بطيئة ومنتظمة من الأمام إلى الخلف لنستطيع رسم الذبذبات ورؤية حركتها على محورين: محور أفقي يمثل الزمن ومحور رأسي يمثل درجات الإزاحة من المستقر، أي حركات التضاغط والتخلخل، وبذلك نراها كما نرى الموجات المائية ترفع ذرات الماء إلى سنام الموجة crest ثم تهبط بها إلى غارب الموجة trough. سنام الموجة المائية يمثل أقصى نقطة إزاحة تصل إليها ذرات الماء في ابتعادها إلى أعلى من مستقرها وغارب الموجة يمثل أقصى نقطة إزاحة تصل إليها في ابتعادها إلى أسفل من مستقرها. ومستقر ذرات الماء هو سطح البركة في حالة السكون التام وعدم حركة الماء مثلما أن مستقر ذرات الهواء هو وضعها في حالة الصمت التام.



الخط المنقط المستقيم أ–د. يمثل نقطة الصفر أو ما سميناه نقطة المستقر، وطول الخط من أ إلى جـ يمثل مسافة التردد، وتسمى أيضا دورة أو ذبذبة. والمسافة من أ إلى ب أو من ب إلى جـ تمثل ذبذبة أو نصف دورة. النقطة القصوى التي يبلغها الجسم المتذبذب في أي من الجهتين تسمى سعة الذبذبة أو الإزاحة، ويمثلها في هذا الشكل النقطة هـ من الجهة العليا والنقطة و من الجهة السفلى. لذا فإن الخط هـ – هَـ يمثل مدى الإزاحة من الجهة العليا والخط د – دَ يمثل مدى الإزاحة من الجهة السفلى.

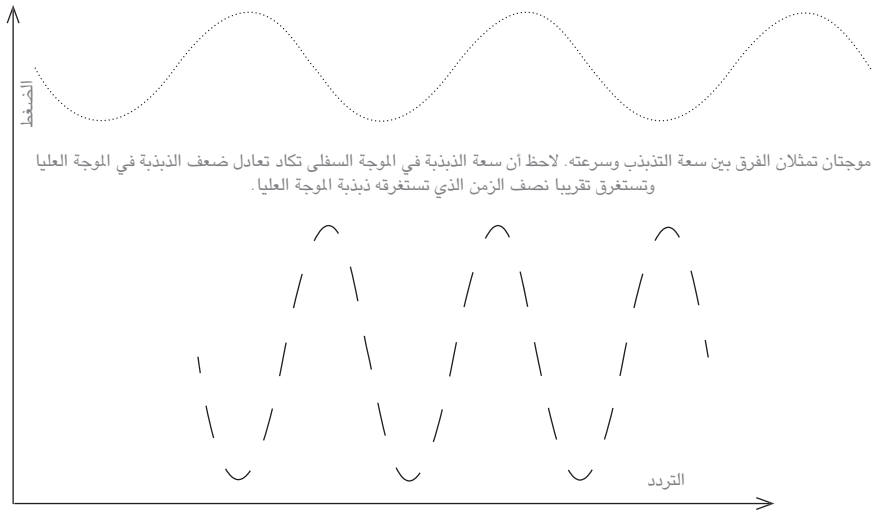
في هذا الشكل المقابل ضبطنا تردد ذبذبات البندول مع ذبذبات الشوكة الرنانة لترسم الذبذبات من البندول ومن الشوكة نفس الخط الإنسيابي المتعرج الذي يمثل في بعده الأفقي مرور الزمن بينما يمثل في بعده الرأسي مسافة الإزاحة من نقطة المستقر إلى أبعد مسافة يتحركها طرف الشوكة أو البندول ذات اليمين وذات الشمال من نقطة المستقر، أي إلى الأعلى وإلى الأسفل منها. والخط الأفقي المستقيم المنقط في الشكل يمثل المستقر الذي تكون فيه الذرات ثابتة غير متذبذبة، ولذا نسميه نقطة المستقر أو خط الصفر. وأي

نقطة على المنحنى تمثل الزيادة في ضغط الهواء في تلك اللحظة إن كانت فوق خط الصفر أو نزول الضغط إن كانت تحت الخط. وقمم المحدبات أو المنحنيات التي فوق خط الصفر تمثل قمم التضاغط في جزيئات الهواء والتي تحدث حينما تتقارب جزيئات الهواء أحدها من الأخرى. أما قمم المنحنيات التي أسفل من نقطة المستقر فتمثل قمم التخلخل حينما تتباعد جزيئات الهواء أحدها عن الأخرى. وأعلى نقطة على المنحنى تمثل المدى الذي تصل إليه حركة الذرات تحت تأثير الضغط الموجب الواقع عليها من الجسم المهتز في حركته نحو الذرات ودفعها للتقارب والتضاغط، وتمثل أسفل نقطة في المنحنى المدى الذي تصل إليه حركة الذرات عند التخلخل والتباعد أو الضغط السالب تحت تأثير ارتداد الجسم المهتز إلى ما وراء مستقره في الجهة المعاكسة. وأقصى حد للإزاحة إلى الأعلى أو إلى الأسفل يُسمى مدى اتساع الذبذبة amplitude، أو اتساع الموجة الصوتية التي تمثل الذبذبة جزءا منها. والدورة الواحدة أو الذبذبة تبدأ من خط الصفر متحركة في هذا الاتجاه إلى أقصى نقطة تستطيع الوصول إليها ثم تنكص ثانية إلى خط الصفر مرة أخرى لتكمل نصف دورة وتواصل حركتها لتتعدى خط الصفر إلى أقصى نقطة تستطيع الوصول إليها في الاتجاه المعاكس ثم تعود ثانية إلى خط الصفر وبذلك تكمل دورة كاملة لتبدأ دورة جديدة. وهكذا فإن كل ذبذبة لها اتساع محدد وسرعة محددة يمكن وصفها من خلالهما. أي أن هذا الرسم البياني يوضح لنا مدى تذبذبات مصدر الصوت ومدى الضغوط والتخلخلات التي يحدثها في ذرات الهواء في تفاعلها مع تلك التذبذبات، ومنه نعرف كم مرة يتذبذب oscillate فيها البندول أو طرف الشوكة في الثانية الواحدة ومدى الإزاحة من المستقر إلى أقصى نقطة يصل إليها من أعلى ومن أسفل نقطة المستقر. وعدد الذبذبات في الثانية الواحدة هو ما يسمى التردد frequency. وسرعة تردد الذبذبات هو ما يحدد درجة حدة الصوت أو غلظته pitch، مثلما أن مدى اتساع الذبذبة، أي مسافة الإزاحة، هو ما يحدد مدى عُلُوّه أو خفوته loudness. فالوتر الغليظ مثلا يتردد بسرعة أقل من الدقيق لذلك فالصوت الصادر عنه أغلظ، وصوت الرجل أغلظ من صوت المرأة لأن الأوتار الصوتية أطول وأعرض وأكثر شدا. وشوكة الرنين التي تُطرق بقوة يكون صوتها أعلى من الشوكة التي تطرق برفق لأن سعة ذبذباتها تكون أكبر وتأثيرها على الأذن أقوى.

ما يهمنا معرفته في الموجة الصوتية هو مقاييس التردد والاتساع أو الضغط pressure، أي مدى الضغط amplitude of pressure الذي هو مسافة الإزاحة. وقد عرّفنا المدى بأنه أقصى نقطة إزاحة تصل إليها ذرة الهواء في ابتعادها عن مستقرها يمينا أو شمالا أثناء عمليات التضاغط والتخلخل. أما ما يحدد هذه المسافة فهو مقدار القوة المحركة لمصدر الصوت والتي بدورها تحدد قوة الضغط الواقع من مصدر الصوت على الجزيئات المتذبذبة. الطاقة الناتجة عن اهتزاز الجسم ينتج عنها تغييرا في ضغط الهواء وتغير الضغط يؤثر على تذبذب جزيئات الوسط الناقل وبالتالي على مدى الموجات الناتجة عن ذلك. فكلما زاد مقدار القوة التي حملت مصدر الصوت على التذبذب كلما زاد اتساع مدى الذبذبة والعكس صحيح. المدى هو العامل الفيزيائي الذي يقابله الإحساس السمعي بعلو الصوت أو انخفاضه sound intensity، فكلما اتسع المدى زاد علو الصوت، والعكس صحيح. وكلما بعدت المسافة بين مصدر الصوت والمتلقي توزعت الطاقة الصوتية على كم أكبر من الجزيئات مما يؤدي إلى تبدد الطاقة وبالتالي إلى ضعف الصوت واستهلاكه في إنتاج الذبذبات المتوالية.

والتردد هو عدد الذبذبات الكاملة للجزيء في كل ثانية cycles per second وتختصر cps. والذبذبة الكاملة

cycle هي حركة الجزيء ابتداء من مستقره في اتجاه ما إلى أقصى نقطة يصل إليها في ابتعاده عن مستقره ثم عودته في الاتجاه المعاكس عابرا نقطة مستقره إلى أقصى نقطة يصل إليها في الاتجاه الآخر ثم العودة مرة أخرى إلى مستقره. والمدة الزمنية التي تستغرقها الذبذبة الكاملة تسمى دورة period. ونظرا لما بين التردد والذبذبة من علاقة فإننا إذا عرفنا التردد عرفنا الذبذبة وإذا عرفنا الذبذبة عرفنا التردد. فإذا كان الجزيء يُتم ١٠٠ ذ/ث (ذبذبة في الثانية) فإن هذا مقياس التردد، وعليه يكون مقياس التردد دورة واحدة في كل واحد من المائة من الثانية، أي أن الدورة تستغرق ١/١٠٠ في الثانية.



موجتان تمثلان الفرق بين سعة التذبذب وسرعته. لاحظ أن سعة الذبذبة في الموجة السفلى تكاد تعادل ضعف الذبذبة في الموجة العليا وتستغرق تقريبا نصف الزمن الذي تستغرقه ذبذبة الموجة العليا.

وقد استعيض مؤخرا عن الذبذبة بالهيرتز فيقال ١٠٠ هيرتز. أما طول الموجة wave length فهو المسافة الطولية للدورة وتحتسب بقسمة سرعة الصوت على تردد الموجة. وكلما زاد تردد الموجة كلما قصرت والعكس صحيح. ومن الواضح أن كمية القوة المحركة وقوة ضغط الصوت sound pressure وكذلك التردد والذبذبة والدورة وطول الموجة كلها كميات فيزيائية يمكن قياسها قياسا آليا موضوعيا ويقابلها من ناحية الانطباع السمعي الذاتي ما يسمى علو الصوت الذي هو مجرد إحساس ذاتي يعتمد على قدرة الأذن في الاستجابة للمؤثرات الصوتية وكذلك درجة حدة الصوت pitch، أي ما يحدد غلظة الصوت أو حِدّته، فكلما زادت ذبذبة الصوت زاد إحساسنا بحدته، والعكس صحيح.

الصوت الصادر عن الشوكة الرنانة نقية الصنع يظل محتفظا بسعة ترددات التي تتكرر بصورة منتظمة على نفس الوتيرة لفترة ملحوظة قبل أن يخفت صوتها وتبدأ في التوقف. والموجة الصادرة عن هذه الشوكة تسمى موجة جيبية sine wave أو sinousidal wave. هذا النوع من الموجات الدورية المنتظمة هو ما يصدر عن الشوكة الرنانة أو البندول. والرسم الناتج عن هذه الموجة سيكون منحنى إنسيابيا تدرّجيا تكون ذبذباته متساوية في الفترة الزمنية التي تستغرقها كلا منها وستكون حدباتها متساوية في الارتفاع والبعد عن خط الصفر، أي أن لها نفس الاتساع، كما في الشكل السابق.

عدد ترددات الجسم المتذبذب لا تتغير بتغير قوة الدفع. لكن مدى الذبذبة، أي سعتها، أو الضغط، هو الذي يتغير لأنه يتوقف على مقدار القوة التي حملته على التذبذب، فكلما زادت القوة زاد الاتساع وكلما قل قلت. لكن تردد الصوت يظل ثابتا مهما اختلف مدى هذه الترددات. فلو طرقنا طرف شوكة طرقات تتوالى شدتها بين القوة والضعف فإن عدد الذبذبات يظل ثابتا لا يتغير لأنه لا يعتمد على قوة الطرق ومقدار الطاقة التي تحركها وإنما على حجم الشوكة وسمكها وشكلها ومادة صنعها وغير ذلك من الخصائص الذاتية للشوكة، لكن الضغط هو الذي يتغير من طرقة لأخرى حسب شدة الطرقة أو ضعفها. كما أن علو صوت الشوكة يتضاءل إذا لم نستمر في طرقها، لكن تردد ذبذباتها يظل ثابتا.

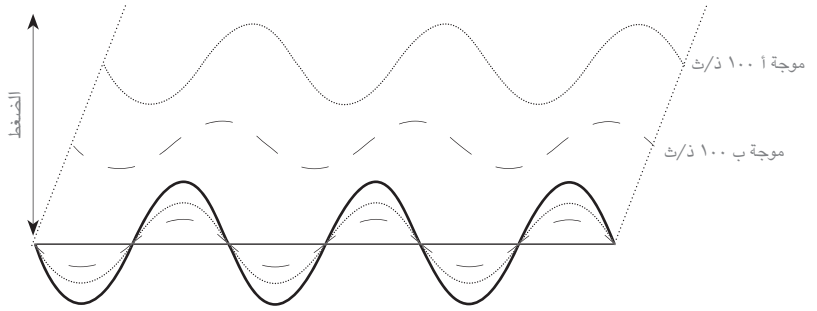
وقياسا على ذلك فإنه مهما كانت قوة الطرقة التي تهوي بها على شعبة الشوكة الرنانة فإن ذلك لن يغير شيئا من سرعة ترددها لكن علو الصوت هو الذي يتأثر بذلك ثم يبدأ بالخفوت تدريجيا دون أن تتغير درجة حدته، أي سرعة التردد. ويبدأ الصوت بالخفوت لأن الضغط، أي مسافات الإزاحة من خط الصفر إلى أقصى مسافة تبتعد عنه شعبة الشوكة (أي سعة حركتها) تبدأ في التضاؤل والانكماش حتى تتوقف الشوكة تماما عن التذبذب. وحتى قبيل لحظة توقف الشوكة تبقى سرعة ترددها على حالها. وبالمقابل فإنه مهما كانت سرعة التردد فلا دخل لها بعلو الصوت وخفوته لأن ما يحدد ذلك، كما قلنا، هو مسافة الإزاحة، أي أقصى نقطة إزاحة في الاتجاهين المتعاكسين من خط الصفر، فكلما اتسعت هذه المسافة كلما زاد الضغط وزاد اضطراب جزيئات الهواء بين تضاغط وتخلخل وبالتالي قوي تأثيرها على طبلة الأذن، والعكس صحيح.

بناء عليه لو كان لديك شوكتان بترددات مختلفة وطرقتهما بنفس القوة فإنك لن تفرق بينهما من حيث قوة الصوت لكن صوت أحدهما سيكون أعلى حدة من الأخرى. وبالمقابل لو كان لديك شوكتان لهما نفس التردد وطرقت أحدهما بقوة والأخرى برفق فإنك لن تتمكن من التفريق بين الاثنتين فيما يتعلق بحدة الصوت إلا أن صوت الأولى سيكون أعلى من الثانية. ولا سبيل إلى تغيير سرعة تردد الشوكة إلا بتغيير حجمها، فالشوكة الأطول أو الأغلظ سوف يكون ترددها أبطأ وبالتالي تنخفض حدة صوتها. فهناك علاقة بين تردد الصوت وكتلة المصدر. والأجسام التي تصدر أصواتا غليظة هي الأجسام الثقيلة أو السميكة التي تهتز ببطء وتصدر عنها ترددات بطيئة؛ مثلما أن البندول تتباطأ اهتزازاته ودوراته كلما ثُقُل وزنه أو طال الخيط المعلق به.

ولتوضيح الفكرة هب أن لديك بندولين متساويان تماما في الحجم والثقل وخيطاهما متساويان في الطول. لو جذبت أحدهما بعيدا عن نقطة المستقر وجذبت الآخر لمسافة أبعد ثم أطلقتهما في نفس اللحظة ستلاحظ أن الذي جذبته لمسافة أطول سوف تكون سعة اهتزازه أكبر من الآخر لكن كلا البندولين يستغرقان نفس الوقت لإكمال ذبذبة كاملة ونحصل منهما على نفس عدد الدورات في الثانية الواحدة. ومهما كانت قوة جذبنا لثقل البندول فإن ذلك سوف يؤثر على سعة ذبذبته لكن لن يؤثر إطلاقا على عدد الذبذبات التي يتمها في الثانية الواحدة. أما لو غيرت حجم أحدهما أو وزنه أو طول خيطه فإن الأمر سيكون مختلفا. فالبندول الأثقل وزنا أو أطول خيطا سنحصل منه على دورات أقل في الثانية الواحدة من البندول الأخف وزنا والأقصر خيطا. وبصرف النظر عن قوة الدفع فإن نفس البندول سوف يُنجز نفس العدد من الدورات في الثانية الواحدة لأن قوة الدفع تؤثر على سعة الاهتزازات لكنها لا تؤثر على سرعتها، فمهما كانت سعة اهتزاز البندول فإنها سوف تستغرق نفس الوقت (ليدفوجد ١٩٩٢: ٣٢–٤٢، ٦٢–٧٢).

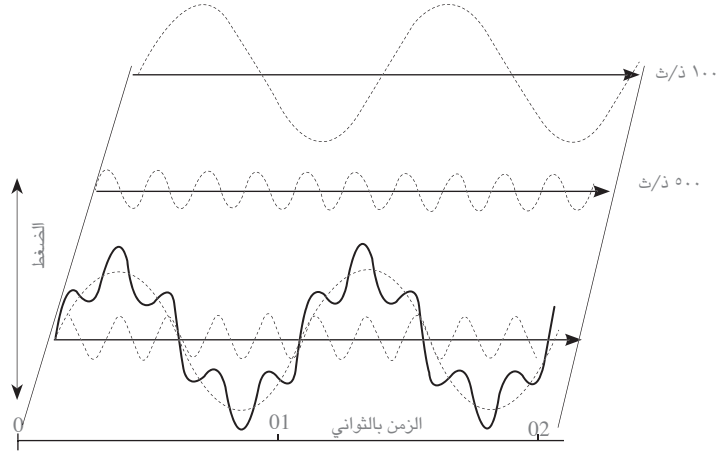
لو أننا طرقنا شوكتين تردد أحدهما ٣٣ ذ/ث وتردد الثانية ٤٤ ذ/ث لسمعنا نغمتين مختلفتين. لكن

لو طرقنا في نفس اللحظة على شوكتين لهما نفس التردد فإن النغمتين الصادرتين عنهما ستكونان نغمتين متوافقتين، أي موجتين لهما نفس التردد، وسوف تعمل كل نغمة منهما على تقوية النغمة الأخرى ونحصل من مجموعهما على نغمة واحدة صوتها أقوى من أي منهما لو أننا طرقناها وحدها. فالذبذبتان تبدآن في نفس اللحظة وفي نفس الاتجاه، مما يعني أنهما في نفس الطور phase ونحصل بذلك على موجة مركبة لها ضعف قوة أحدهما (مالمبرج ١٩٨٥/أ: ١٩).



دمج الموجة أ مع الموجة ب يعطينا موجة سعتها الضعف

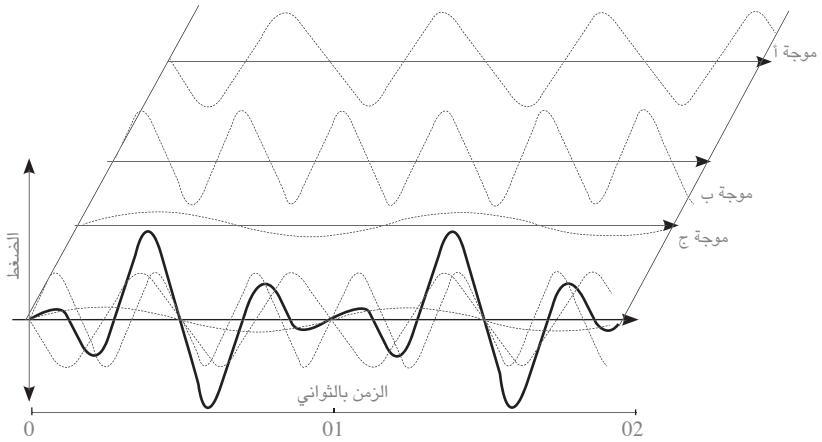
أما لو أننا طرقنا في نفس اللحظة شوكتين تردد أحدهما مثلا ١٠٠ ذ/ث، والأخرى ٥٠٠ ذ/ث فإننا لن نحصل لا على نغمتين ولا على نغمة بسيطة مقواة وإنما على نغمة مركبة من مجموع هاتين الموجتين البسيطتين. السبب في ذلك يعود إلى أن هاتين الموجتين البسيطتين متوافقتان، بمعنى أن كل ذبذبة من ذبذبات الشوكة ذات التردد ١٠٠ ذ/ث تستغرق نفس الزمن الذي تستغرقه خمس ذبذبات من الشوكة الأخرى. أي أن هاتين النغمتين التوافقيتين سوف تلتقيان عند المستقر، أي نقطة الصفر، مع نهاية كل ذبذبة من ذبذبات الشوكة الأولى ونهاية كل خمس ذبذبات من ذبذبات الشوكة الأخرى. بناء على ذلك فإن الذبذبة الخامسة والعاشرة والخامسة عشر الخ من ذبذبات الشوكة الثانية ستبدأ مع الذبذبة الثانية والثالثة والرابعة الخ من الأولى وهكذا،



موجة مركبة (بالخط الأسود) ناتجة من دمج الموجتين ١٠٠ ذ/ث + ٥٠٠ ذ/ث (بالخط المنقط الخفيف)

وهذا هو المقصود بالتوافق harmony. وتجتمع في هذه الموجة المركبة خصائص كل من الموجتين المكونتين لها، فسرعتها هي سرعة الموجة ١٠٠ ذ/ث ولكن سرعة الموجة ٥٠٠ ذ/ث تظهر في تشكيل القوس العلوي والقوس السفلي للذبذبة المركبة (أيوب ١٩٦٨: ١٠٥–٧). من خصائص الموجات التوافقية التي تشكل في مجموعها موجة مركبة أن ترددها المنتظم هو القاسم المشترك الأعظم لمجموع الترددات التوافقية الداخلة في تكوينها، أي ١٠٠ ذ/ث بالنسبة للموجتين السابق ذكرهما، وهذا هو التردد الأساس أو النغمة الأساس fundamental frequency وهي التي تحظى بالاتساع الأكبر، أما النغمات الأخرى الداخلة في تركيب النغمة فتسمى نغمات توافقية harmonics. وأول نغمة توافقية تأتي في حجمها بعد الأساس تسمى النغمة التوافقية الثانية يلي ذلك النغمة التوافقية الثالثة ثم الرابعة ثم الخامسة، الخ. والتوافقية هي أي عدد صحيح من مضاعفات التردد الأساس. فلو كان لدينا أربع موجات تذبذباتها ١٠٠ ذ/ث، ٢٠٠ ذث، ٣٠٠ ذ/ث، ٥٠٠ ذ/ث فإن الأولى هي الأساس والثانية هي التوافقية الثانية والثالثة هي التوافقية الثالثة والرابعة هي التوافقية الخامسة، ولو أضفنا موجتين ذبذباتهما ٧٠٠ ذ/ث و ٩٠٠ ذ/ث لكانتا هما التوافقية السابعة والتوافقية التاسعة على التوالي، وهكذا (ليدفوجد ١٩٩٢: ٥٠). أي أن النغمات التوافقية ما هي إلا مضاعفات الموجة الأساس وموجة الأساس ما هي إلا موجة ترددها يساوي القاسم المشترك الأعظم لترددات موجاتها التوافقية.

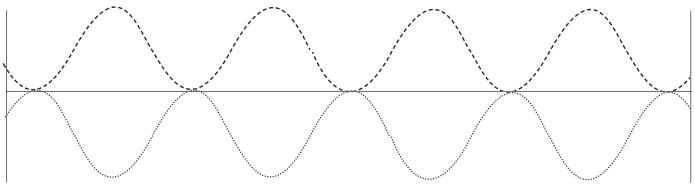
وينبغي التأكيد هنا على أنه ليس من الضروري أن يكون تردد الموجة الأساس من ضمن ترددات الموجات التوافقية الداخلة في تكوين الموجة المركبة، فموجة الأساس هي أي موجة ترددها يساوي القاسم المشترك الأعظم لترددات الموجات المكونة للموجة المركبة حتى لو لم تكن من بين هذه الموجات. فلو أضفنا إلى الموجات الأربع السابقة موجة خامسة ترددها ٧٥ ذ/ث لأصبح القاسم المشترك الأعظم بين هذه الموجات الخمس البسيطة والذي يمثل ترددها الأساس هو ٢٥ ذ/ث، علما بأنه لا توجد أي موجة لها هذا التردد من بين مكونات هذه الموجة المركبة. ومهما كان عدد النغمات التوافقية فإن ذبذباتها كلها تلتقي مع النغمة الأساس عند مستقرها في نقطة الصفر بعد أن تكون كل منها قد أكملت عددا من الذبذبات يتفق مع ترددها، بصرف



موجة مركبة (بالخط الأسود) ناتجة من دمج ثلاث موجات (أ، ب، ج بالخط المنقط الخفيف)
لاحظ كيف نحصل على الموجة المركبة من جمع وطرح الفروقات بين الموجات أ، ب، ج

النظر عن عدد الموجات التوافقية التي تتألف منها الموجة الأساس. المهم هو أن تلتقي في لحظة ما كل الموجات في نقطة واحدة عند خط الصفر، وأن تتكرر نقطة الالتقاء هذه بصفة دورية، أي بعد كل لحظة تكمل فيها الموجة الأساس نصف دورة. هذا يعطي النغمة شكلا مركبا لكنها نغمة دورية مركبة تتألف من موجة أساس وموجات توافقية، أي من عدد من الموجات يقل أو ينقص بحسب نوعيتها.

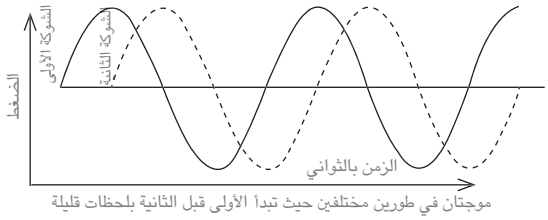
الموجات التوافقية لا تحدد تردد الموجة الأساس لكنها تؤثر على شكل ذبذباتها. لذا نجد أن المنحنى التذبذبي للموجة المركبة لن يكون منحنى إنسيابيا، كما في الموجة البسيطة. شكل المنحنى التذبذبي لأي موجة مركبة يتحدد في أي نقطة بناء على حاصل جمع وطرح ترددات مكوناتها التوافقية في تلك النقطة، أي توزيع القوة على ترددات هذه المكونات في تلك اللحظة. وحينما تتساوى القوة السالبة مع القوة الموجبة فإنهما تلغيان كل منهما الأخرى. ويمكن تبيان ذلك بأن نرسم منحنى انسيابا منقطا خاصا بكل موجة ثم نرسم فوقهما منحنى نموذجيا بخط متصل يمثل ناتج تفاعلهما أحدهما مع الأخرى. ونستطيع أن نتبين أن الشوكتين حينما تعملان معا لزيادة الضغط تكون محصلة الضغط فوق ما تنتجه أي منهما منفردة، وحينما تعمل الشوكتان معا لتقليل الضغط تكون المحصلة أقل مما ينتج عن أي منهما على انفراد. أما حينما تتضادان في الجهد، بمعنى أن تعمل أحدهما على زيادة الضغط والأخرى على تقليله أو العكس، فإن المحصلة هي ناتج جمع وطرح قوى الضغط الموجبة مع قوى التخلخل السالبة بين الموجتين عند نقاط التضاد (ليدفوجد ١٩٩٢: ٨٣). وبهذه الطريقة، فإننا كلما أضفنا موجات بسيطة أخرى إلى الموجة المركبة كلما تغير شكل المنحنى التذبذبي النموذجي، الذي قلنا إنه حاصل جمع وطرح ترددات الموجات البسيطة المكونة للموجة المركبة، وذلك تبعا لعدد الموجات التوافقية البسيطة الداخلة في تكوينه. وحيث أن نصف الدورة للموجة الجيبية ما هو إلا صورة معكوسة تتناظر تماما مع النصف السابق أو اللاحق لها فإنه لو كان لدينا موجتان جيبيتان متماثلتان في التردد والسعة وأزحنا أحدهما عن الأخرى بمقدار ٩٠ درجة بحيث تكون قوى الضغط الموجبة لأحدهما متعاكسة تماما مع قوى التخلخل السالبة للأخرى فإنهما سيلغيان أحدهما الأخرى فلا نسمع شيئا البتة.



الضغط السالب في أحد الموجتين يتساوى مع الضغط الموجب في الأخرى مما يؤدي إلى إلغاء أي أثر صوتي لهما

وليس هناك حد لعدد الموجات التي يمكن أن تتجمع توافقيا مع بعضها البعض لتكوّن موجبة مركبة، وكلما زاد عدد هذه الموجات التوافقية كلما زادت الموجة تعقيدا في تركيبها. وبإمكاننا باستخدام العدد الكافي من النغمات أن نحصل على أي شكل من أشكال الموجات التي يحلو لنا تخليقها، شريطة أن نأخذ العدد الكافي لإنتاجها من النغمات النقية التي تختلف كل منها عن الأخرى في ترددها ومداها ثم تركيبها معا بالطريقة الملائمة. ويمكننا أن نغير من حدة الصوت وشدته بتغيير ترددات أو اتساع الموجات التوافقية التي

تدخل في تركيب الموجة الأساس (أيوب ١٩٦٨: ١٠٧–٨). إلا أن تردد النغمة الأساس في الموجة المركبة يظل ثابتا مهما أضفنا إليه أو حذفنا منه من ترددات توافقية. ومجموع الترددات التي تتألف منها الموجة المركبة كل منها مستقلة عن الأخرى عدا كونها تناغمية مما يمكننا من تركيبها على بعضها بالإضافة أو الحذف دون أن يؤثر ذلك على حدة الموجة (Brosnaham & Malmberg 1970: 17-8). وقد تتفق موجتان مركبتان في التردد الأساس وفي الاتساع لكنهما تختلفان في عدد الموجات الداخلة في تكوينهما، أي فيما يسمى البناء الهارموني harmonic structure، وهذا ينشأ عنه اختلاف الموجتين في كيفية الصوت sound quality أو timber الناتج عنهما. وكيفية الصوت هو الأثر السمعي الناتج عن عدد الموجات البسيطة التي تتكون منها الموجة المركبة التي تحمل الصوت للأذن وتردد كل من هذه الموجات واتساعها (Catford 1977: 53).

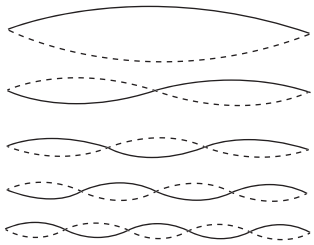


ويمكننا أن نغير في شكل المنحنى التذبذبي في نفس الموجة المركبة لو أننا غيرنا في طور مكوناتها، أو ما يسمى phase، بحيث لا تبدأ كلها، أو واحدة منها على الأقل، في نفس اللحظة وإنما في لحظات متتالية مما يجعلها تتذبذب في أطوار مختلفة out of phase. لكن إذا كان الاختلاف بين شكل الموجات مرده فقط إلى اختلافها في الطور فإن الأذن لا تميز بينها وتعدها نغمة واحدة، فالأذن تحيّد هذا الاختلاف في الطور بين النغمات المركبة، وليس له عليها أي أثر.

مما تقدم نستنتج أن الأصوات تختلف من ثلاثة أوجه؛ فاختلاف الطاقة يؤدي إلى اختلاف الضغط، أي المدى أو سعة إزاحة الذبذبات وبالتالي إلى اختلاف علو الصوت، واختلاف تردد الذبذبات يؤدي إلى اختلاف درجة حدته، واختلاف الموجات الجيبية البسيطة المكونة للموجة المركبة في العدد أو السعة ينتج عنه اختلاف كيفية الصوت، وهذا ما يحدده طبيعة المادة التي يصدر عنها الصوت، ومن هنا كان صوت الناي يختلف عن الكمان وتلك عن العود بالرغم من تناغم هذه الآلات. فقد تصدر عن آلات الجوقة الموسيقية ذبذبات بنفس القوة ونفس سرعة الترد لكن بمقدورنا، مع ذلك، تمييزها عن بعضها البعض تبعا لاختلاف مادة الأجسام التي صنعت منها هذه الآلات.

تختلف ذبذبة الأجسام المهتزة حيث أن لكل جسم تردده الخاص به والذي يخضع للخواص النوعية للجسم وتتحكم فيه مجموعة من العوامل مثل الحجم ومادة الصنع والوزن والطول والسماكة وقوة الشد وغير ذلك من الخصائص المادية. فذبذبة الأجسام الخفيفة والرفيعة والقصيرة أسرع من الثقيلة والسميكة والطويلة. وذبذبة الوتر المشدود أسرع من المتراخي. وفي حالة التجاويف حجمها وشكلها وحجم فتحتها وحجم الكتلة الهوائية بداخلها التي تتعرض للضغط وتتذبذب. لكن مهما كانت خصائص الجسم المهتز فإن

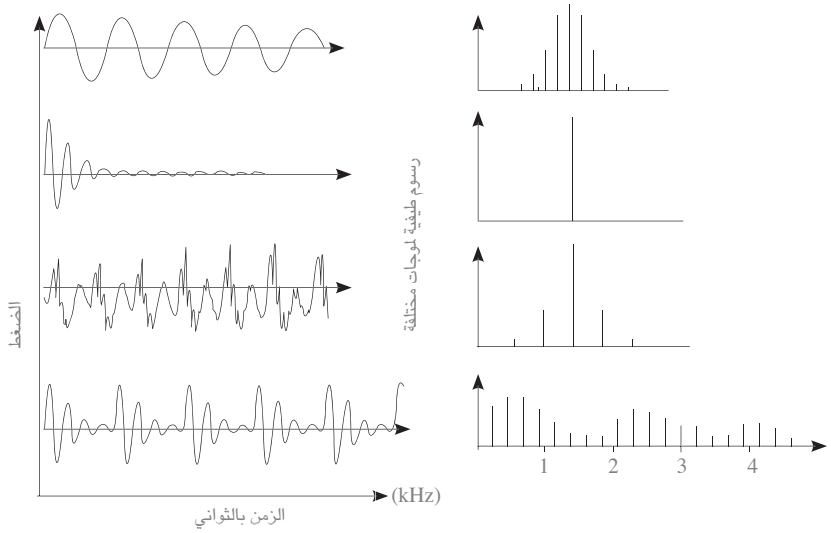
نفس التردد لذبذبة معينة يعطينا نفس النغمة، فكلما زاد التردد علت النغمة وكلما قل انخفضت. فالجسم المهتز الذي يسبب اضطرابا disturbance في جزيئات الهواء ويُحدث الصوت، إن لم يكن شوكة رنانة نقية، تتذبذب أجزاءه بنسب متفاوتة ويصدر عنه مجموعة من النغمات المتوافقة تشكل في مجموعها نغمة مركبة. فكل جزء من أجزائه يتذبذب في نفس الوقت وبسرعة تتوافق نسبيا بين الجزء المتذبذب والجسم بأكمله، فالنصف يتذبذب بسرعة تبلغ ضعف سرعة الجسم كله، والثلث يتذبذب بسرعة تبلغ ثلاثة أضعاف الجسم والربع أربعة أضعاف الجسم، وهكذا. فمثلا حينما يتذبذب وتر فإنه لا يولد فقط النغمة الرئيسية الخاصة بالوتر كله بل إنه يولد مجموعة من النغمات التوافقية تمثل تردداتها مضاعفات النغمة الأساسية للوتر. فنصف الوتر يهتز بسرعة تعادل ضعف تذبذب الوتر كله ويهتز ثلثه بسرعة تعادل ثلاثة أضعاف تذبذبه كله، وهكذا. ومن هنا فإنه لا تصدر عن الوتر ذبذبة واحدة فقط هي الذبذبة الأساسية وإنما تصدر عنه أيضا في الوقت نفسه سلسلة من التذبذبات التوافقية تردداتها عبارة عن مضاعفات لترددات الوتر بالكامل (مالمبرج ١٩٨٥/أ: ١٥، ٢٧).



التذبذبات التوافقية المختلفة لنفس الوتر

رد الموجة المركبة إلى مكوناتها الأساسية من الموجات البسيطة يسمى التحليل التوافقي harmonic analysis، أي تحليل الموجات التوافقية التي تتكون منها الموجة المركبة والتوزيع النسبي للقوة على هذه الموجات، ويسمي أيضا تحليل فُورْيِير Fourier analysis نسبة إلى العالم الفرنسي الذي اكتشف هذه الطريقة عام ١٨٢٢ (ليدفوجد ١٩٩٢: ٤٧). ويمكننا عرض نتيجة هذا التحليل التوافقي باستخدام جهاز التحليل الطيفي للصوت spectrograph للحصول على رسم بياني يسمى الرسم الطيفي spectrogram، وهو الوسيلة الأخرى لتمثيل الصوت بصريا بالإضافة إلى الرسم الذبذبي oscillogram الذي لجأنا له حتى الآن. وعلى خلاف الرسم الذبذبي فإنه يتم تمثيل سعة الترددات في الرسم الطيفي على شكل خطوط رأسية يختلف ارتفاعها حسب اتساع المدى، أي حسب الضغط، بينما يتم تمثيل سرعة الترددات حسب موقع الخطوط الرأسية على المستوى الأفقي، وكلما كانت أبعد إلى اليمين كلما كانت أعلى، ولذلك يسمى هذا الرسم بالرسم الطيفي الخطي. وبينما نجد أن من أبرز ملامح رسوم المنحنيات الذبذبية هو تحديد الطور، فإن الرسم الطيفي لا يوضح الطور لأي من الموجات. ولكن ليس هذا بالأمر المهم لأن الطور، كما سبق وأن قلنا، لا يؤثر على إحساسنا وإدراكنا لكيفية الصوت. المهم بالنسبة للسمع هو شكل الموجة المركبة الناتج عن تكوينها التوافقي، أي عدد وشكل الترددات البسيطة الداخلة في تكوينها والتوزيع النسبي للقوة على هذه الترددات، وهذان العاملان هما اللذان يحددان كيفية الصوت الذي نحصل عليه من مثل هذه الموجة المركبة، وبالتالي طيفها الصوتي spectrum. هذا يعني أن الرسم الطيفي، على خلاف المنحنى التذبذبي، لا يتأثر باختلافات الطور وهو في ذلك يشبه سلوك جهاز السمع وطريقة استقبال الأذن للأصوات (مصلوح ٢٠٠٠: ٤٨–٩). لذا عوضا عن المنحنى التذبذبي للموجة المركبة، يمكننا بواسطة الرسم الطيفي أن نرسم طيفا للموجة على شكل خطوط تمثل تردد ومدى الموجة الأساس وكذلك الموجات الثانوية التي تتوافق معها على هيئة خطوط بحيث يتم تمثيل كل موجة بخط يتحدد موقعه على المحور الأفقي تبعا لتردد الموجة التي يمثلها ويتحدد طوله رأسيا تبعا لاتساعها؛ بحيث أنه كلما كان الخط موقعه أبعد إلى اليمين على المستوى الأفقي كلما كان تردده أسرع وصوته أشد حدة، وكلما كان أطول في الاتجاه الرأسي كلما كان مداه أوسع وصوته أعلى.

ولا يمثل الرسم الطيفي القيم المطلقة لقوة الموجة، أي اتساع مكوناتها، لأن شكل الموجة لا يتحدد بالقيم المطلقة لاتساعات هذه المكونات وإنما بالعلاقات التناسبية بينها. فلو زاد الاتساع في الموجة المركبة وعلا صوتها فإن هذا يعني أن ترددها الأساس زاد اتساعه وبالتالي فإن اتساع جميع توافقياته سوف يزداد بالضرورة وبذات النسبة. الرسم الطيفي لأي موجة تكرارية مركبة سيبين أن ترددات مكوناتها هي مضاعفات صحيحة للتردد الذي يتكرر به شكل الموجة. ولو حصلنا على عدد من الموجات المركبة التي تختلف اتساعات تردداتها ولكن النسبة بين هذه الاتساعات هي نفس النسبة فإننا سنحصل على منحنى طيفي لكل منها يشبه الآخر (ليدفوجد ١٩٩٢: ٥٣).



الرنين والترشيح والتقوية

أي جسم قابل للاهتزاز له تردده الطبيعي natural frequency الذي ينتج عنه إذا حرَّكَته قوة أخرى وحملته على الاهتزاز؛ ويظل يهتز حتى تكف القوة المحركة له من الضغط عليه. ويسمى هذا الاهتزاز بالاهتزاز الحر free vibration. ولا يهتز الجسم فقط عندما يتعرض مباشرة لقوة تجبره على الاهتزاز. بل إنه لو تعرض لموجة صوتية تشتمل على تردد مساو لتردده الطبيعي فإن ذلك سيحمله أيضا على الاهتزاز. فقد يهتز الجسم المصوِّت ويتذبذب بفعل طرق مباشر وقع عليه أو نتيجة لانتقال الذبذبات إليه من جسم آخر، حيث يمكن لجسم مهتز أن ينقل ذبذباته لجسم آخر ذبذباته لها نفس تردد ذبذبات ذلك الجسم. فلو أننا عرّضنا شوكة رنانة ترددها الطبيعي ١٠٠ ذ/ت لموجة صوتية صادرة من مصدر آخر تشتمل على عدد من الموجات تردد أحدها مساو للتردد الطبيعي للشوكة، أي ١٠٠ ذ/ث، فإن الشوكة الساكنة سوف تتجاوب مع هذا التردد وتهتز اهتزازا قسريا forced vibration، أو ما يسمى استجابة رنينية resonance response، أو، للاختصار، رنين resonance. ويسمى الجسم المهتز قسريا الجسم المستجيب أو الجسم الرنان resonator. ويسمى تردده تردد الرنين resonant frequency، وهو التردد الذي يمتص ثم يطلق أكبر قدر من الطاقة القادمة من مصدر الصوت الأصلي. فإذا كان التردد الخاص بالجسم الرنان هو نفس تردد الذبذبة التي يعترضها فإنه يبدأ

في التذبذب أيضا (مالمبرج ١٩٨٥/أ: ١٧–٢٠). أما لو أتينا بشوكة أخرى ترددها مختلفا عن تردد الأولى فإنها لن تتجاوب ولن تصوت. ولو أتينا بشوكتين تردد كلتاهما ١٠٠ ذ/ث ووضعناهما جنبا إلى جنب وطرقنا أحدهما ثم أوقفناها مباشرة فإن الأخرى سوف تهتز بعد برهة وتتذبذب حتى لو لم نطرقها وتصدر صوتا بنفس درجة الصوت الصادر عن الأولى لكن بقوة أقل. فالشوكة الثانية التي لم نطرقها امتصت الطاقة التي اكتسبتها من الأولى واختزنتها لبرهة ثم أطلقتها على شكل تردد مماثل لتردد الشوكة الأولى ولكنه أضعف لأنها استهلكت بعض الطاقة المختزنة في تحريك ذراتها بينما صدر الباقي على شكل ذبذبات. لكن لو لم نوقف نغمة الصوت الناتج عن الجسم المهتز اهتزازا حرا، أي الشوكة الأولى مصدر الصوت الأصلي، وتركنا الشوكتين تهتزان معا فإن نغمة الصوت الناتج عن الجسم المهتز قسريا، أي الجسم الرنان، ستكون أقوى من النغمة الأصلية لوحدها لأنها عبارة عن التردد الطبيعي للجسم المهتز اهتزازا حرا مضافا إليه تردد الجسم المهتز اهتزازا قسريا، أي الجسم الرنان. وعادة ما تكون نغمة الجسم الرنان أقوى من النغمة الأصلية لمصدر الصوت لأنها عبارة عن التردد الطبيعي لمصدر الصوت المهتز اهتزازا حرا مضافا إليه تردد الجسم الرنان المهتز اهتزازا قسريا، مما ينتج عنه تقوية reinforcement لمدى التردد الطبيعي لمصدر الصوت الأصلي بعد أن أضيف إليه التردد الرنيني.

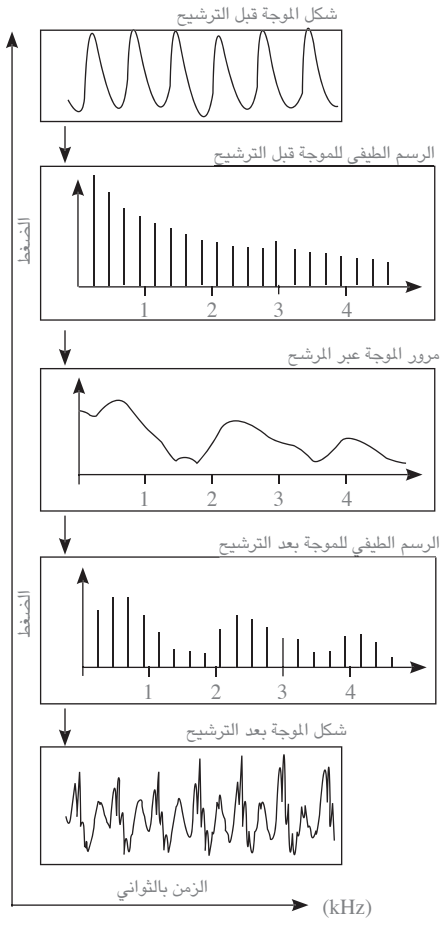
في حالة الرنين القسري نجد أن كل حركة لجزيئات الهواء إلى الخلف وإلى الأمام بفعل تذبذب الشوكة مصدر الصوت الأصلي تعمل كدفعة صغيرة يضاف تأثيرها إلى تأثير الدفعة السابقة لها على ذبذبات الشوكة المُرِنَّة. ولأن الشوكتين لهما نفس التردد الطبيعي وتهتزان بنفس المعدل فإن كل دفعة من هذه الدفعات الصغيرة تصل تماما في اللحظة المناسبة لتضيف تأثيرا إضافيا إلى كمية الاهتزاز الكلي. أي أن الموجة الصادرة عن الجسم الأصلي تتفاعل مع الموجة الصادرة عن الجسم الرنان والموافقة لها في التردد لتضاعف من سعة ذبذباتها وعلوها. هذا التأثير يشبه ما يحدث حينما تبدأ أرجوحة بالاهتزاز وفي اللحظة التي تنهي فيها دورة لتبدأ أخرى نعطيها دفعة خفيفة ونكرر ذلك في اللحظات المناسبة. فبعد كل دفعة سوف تزداد سعة دورة الأرجوحة؛ لكن لو لم نضبط توقيت الدفعات ودفعنا الأرجوحة قبل إكمال دورة وبداية أخرى فإننا سنعيق حركتها وربما نوقفها. وهذا تماما ما يحدث لشوكتين رنانتين لهما نفس التردد. "فالضربة الصغيرة الأولى توصل حركة ضئيلة جدا للشوكة الرنانة. ولكن هذه الشوكة وقد تحركت من موضع سكونها تتحرك إلى الخلف ثانية بنفس معدل اهتزازها الطبيعي، ولا تكاد تبدأ أرجحة ثانية حتى تحدث لها الضربة الثانية. هذه الضربة وجميع ما يليها من ضربات تالية تساعد في إحداث اهتزازات كبيرة. بيد أنه من الواضح أن الشوكة الثانية لن تهتز إلا في حالة وصول الضربات إليها في اللحظات المناسبة" (ليدفوجد ١٩٩٢: ٧٦). وهذا شبيه بما سبق شرحه وتوضيحه بالشكل حينما قلنا إننا لو طرقنا في نفس اللحظة على شوكتين لهما نفس التردد فإن النغمتين الصادرتين عنهما ستكونان نغمتين متوافقتين لهما نفس التردد وسوف تعمل كل منهما على تقوية الأخرى ونحصل من مجموعهما على نغمة واحدة صوتها أقوى من أي منهما لو أننا طرقناها وحدها.

وليست قوة التردد من مصدر الصوت أو علوه هو ما يحمل الجسم الرنان على الرنين وإنما التردد الذي يكون قريبا من تردد المرنان هو ما يحمله على الرنين. ويتوقف مدى تجاوب المرنان وسعة اهتزازه عند أي تردد على القدر الذي يوجد به هذا التردد في موجته المركبة (O'Conner 1973: 83). وإذا ما توفر هذا الشرط

فإن قوة الاستجابة في هذه الحالة سوف تتأثر بقوة التردد من مصدر الصوت ويكون الصوت أعلى. وكلما زاد عدد الترددات الطبيعية للجسم المهتز اهتزازا حرا كلما زاد عدد الترددات التي يستجيب لها وتحمله على أن يتردد قسريا، خصوصا تلك الواقعة غير بعيد من نغمته الأساسية، أي تردده المركزي، وتكون استجابته الرنينية عند ذروتها حينما يتعرض لتردد يماثل تردده المركزي.

وبطبيعة الحال فإن الجسم الرنان لن يستجيب لمجموع الترددات الصادرة عن منشأ الصوت وإنما سيستجيب فقط للترددات التي تتماثل مع تردداته الطبيعية ويقويها بينما يستبعد ما عدا ذلك. فلو كان لدينا شوكة غير نقية التركيب يصدر عنها موجة بترددات مختلفة ووضعنا في طريقها عددا من الشوكات النقية ذات الترددات المختلفة فإن ما تتوافق تردداتها من هذه الشوكات مع أي من ترددات الموجات البسيطة المكونة للموجة المركبة الصادرة عن الشوكة غير النقية سوف تتجاوب مع تلك الموجة وتتردد بدورها وتستجيب لها كجسم رنان، وهذه العملية تسمى ترشيح filtering. الشوكات النقية في هذا المثال تعمل كمُرشِّحات تلتقط كل منها التردد المتوافق مع ترددها الطبيعي وتمكننا بذلك من تحليل الموجة المركبة إلى موجاتها التوافقية الداخلة في تشكيلها ومعرفة تردد كل منها وسعته. والشوكة غير النقية بدورها سوف تستجيب لأي شوكة نقية تصدر عنها موجة تردداتها تتوافق مع أي من ترددات الموجة المركبة التي تصدر عن الشوكة غير النقية (أيوب ١٩٦٨: ١١٩–٢٢؛ مصلوح ٢٠٠٠: ٥٠–٢).

الطاقة في الموجة المركبة يتم توزيعها على كافة الترددات التوافقية المكونة لها ولكن بنسب متفاوتة، إذ يحظى التردد الأساس بالكم الأكبر منها يليه التوافقية الثانية ثم الثالثة، وهكذا بالتوالي. إلا أنه يمكن إعادة هذا التوزيع للطاقة وبطرق مختلفة وذلك بواسطة المُرشِّحات التي يمكنها أن تقوي بعض الترددات وتضعف الأخرى. وبطبيعة الحال فإن التكوين الطيفي للموجة بعد الترشيح يعتمد على طبيعة المرشِّح لكنه قطعا سيكون مختلفا بعد الترشيح عنه قبل الترشيح، فصوت الموجة قبل الترشيح غير صوتها بعد الترشيح لأن الترشيح يغير من كيفية الصوت بإعادة توزيع القوى على الترددات بحيث يقوي بعضها التي ربما تكون ضعيفة في الأصل ويهمل البعض الآخر إن لم يكن مماثلا لتردداته الطبيعية مهما كانت قوته قبل الترشيح، وبذلك نخرج بموجة مختلفة التركيب (مصلوح ٢٠٠٠: ٥٦–٩). فلو قمنا مثلا بتقوية الترددات السريعة واستبعدنا البطيئة لحصلنا على صوت حاد ولو فعلنا العكس لحصلنا على صوت أجش. إذن يمكننا بواسطة الترشيح تحليل الموجة المركبة وردها إلى مكوناتها من الموجات التوافقية البسيطة. كما يمكننا بواسطة خاصية الرنين والمُرشِّحات تقوية بعض ترددات الصوت المركب التي تتوافق مع ترددات الجسم الرنان وإضعاف الترددات الأخرى غير المتوافقة مع ترددات ذلك الجسم. وهذا تحديدا ما يحدث في صناديق الآلات الموسيقية التي تقوي ترددات الأوتار لتصبح أعلى ويمكن سماعها عن بعد وبوضوح، أو ما يحدث عندما ننفخ في جسم مجوف كالناي أو القارورة الفارغة. كل ذلك يعتمد على حجم الجسم الرنان وسمكه ومادته وغير ذلك من العوامل. ومن هنا جاء اختلاف كيفية الصوت من شكل لآخر من هذه الأشكال. ما يحدث في حالة القارورة مثلا أنه من بين موجات النفخ الضعيفة يتم تقوية ما يتفق منها مع درجة تذبذبات القارورة وحينما تتحرك هذه الذبذبات وتنتشر داخل القارورة تصطدم بجدرانها فترتد وتكتسب من الارتداد والاصطدام المتكرر قوة إضافية جديدة تزيد من طاقتها وعلو صوتها. وبما أن هذه الذبذبات متوافقة فإنها تؤلف مع بعضها البعض موجة واحدة مركبة درجتها هي درجة جسم القارورة (أيوب ١٩٦٨: ١٢١–٥). وسوف نلاحظ أن



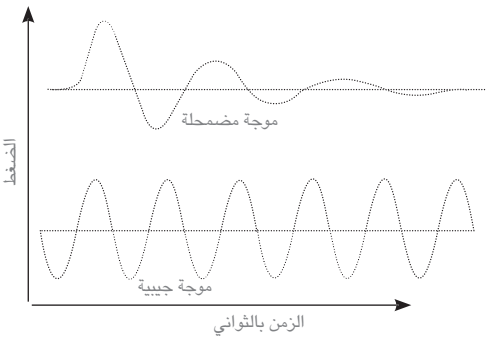
صوت القارورة يختلف باختلاف سعتها وحجمها وأبعادها وسعة فتحتها لأن كل شكل من هذه الأشكال سوف يعمل على تقوية ترددات معينة من بين الموجات الضعيفة الناتجة عن النفخ بما يتفق مع تردده الطبيعي وهي غير تلك التي تقويها الأشكال الأخرى. وهذا ما يحدث أيضا أثناء تعبئة قارورة بالماء من الصنبور، فصوت الموجات التي تصدر عنها تتغير وكلما زادت كمية الماء وتقلصت كتلة الهواء المتذبذب داخلها كلما زادت حدة هذه الموجات. ونستطيع بواسطة هذه الاختلافات أن نعرف متى يحين الوقت لقفل الصنبور لأن القارورة شارفت على الامتلاء.

مما سبق تتبين لنا العلاقة بين مفهومي الرنين والتقوية ومفهوم الترشيح. ولمزيد من التوضيح دعنا نفترض أننا صممنا جهازا يحتوي على مصدر للصوت وعلى جسم رنان بحيث لا نسمع الصوت من مصدره الأصلي رأسا وإنما فقط من خلال عبوره بالجسم الرنان وما يصدره ذلك الجسم من ذبذبات قسرية. في هذه الحالة نكون حولنا الجسم الرنان إلى مُرشِّح، أي أننا من خلاله قمنا بترشيح الصوت الأصلي من خلال تمريره عبر الجسم الرنان. في هذه الحالة لن يصل إلينا من ذبذبات مصدر الصوت الأصلي إلا ما يسمح الجسم الرنان/المُرشِّح بتمريره، أي تلك التي يستجيب لها الجسم الرنان ويقوم بتقوية ما يقع منها في نطاق تردده الطبيعي، بينما يستبعد الذبذبات الأخرى فلا تصل آذاننا، كما يتضح من الشكل المقابل.

تكلمنا حتى الآن عن الموجات التوافقية المركبة ذات الترددات المنتظمة والتي كلها عبارة عن مضاعفات لنغمة أساس. فالشوكة النقية يصدر عنها عند اهتزازها ترددا واحدا بسيطا يستأثر بكل الطاقة الناتجة عن الاهتزاز ولن تصاحبه أي ترددات جانبية أخرى تؤثر عليه. مثل هذه الموجات الصافية ذات الترددات المنتظمة التي لا تتلاشى بسرعة لا تصدر إلا من شوكة رنانة نقية الصنع لا تشوب مادتها أي شوائب. التردد البسيط يتميز بأنه لا يفقد الطاقة المحركة له بسرعة ويستمر لمدة طويلة نسبيا. إلا إنه حتى الشوكة الرنانة مهما بلغت درجة نقائها فأنت حينما تطرقها طرقة واحدة سوف تتذبذب بقوة مسموعة لكن الذبذبات عادة لا تلبث أن تضعف بعد برهة وتستهلك في إنتاج الذبذبات اللاحقة لها ونحس بأن صوتها بدأ يضعف تدريجيا حتى يتلاشى تماما وتعود إلى الصمت إن لم نعاود طرقها مرة أخرى. لكننا نتغافل عن هذا الأمر في حالة الشوكة الرنانة لأنها نظرا لنقاء مادتها تستمر في التذبذب على نفس الوتيرة لعدة ثوانٍ وفقدانها للطاقة من البساطة بحيث يمكن التغاضي عنه عمليا.

لكن معظم الأصوات التي نسمعها لا تتألف من موجات جيبية بسيطة. فهناك موجات مركبة تفتقد لهذه

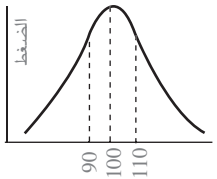
الخصائص، أي خاصية التوافقية وانتظام الترددات. هذه هي الموجات غير المنتظمة، أي التي لا تتكرر بشكل دوري منتظم. فالشوكة غير النقية لن نحصل منها على تردد واحد بسيط بل على تردد أساس وعدة ترددات أخرى ثانوية تنتشر على جانبيه وتستأثر بكم لا بأس به من الطاقة الناتجة عن الاهتزاز بحيث يحظى التردد الأساس بالكم الأكبر من الطاقة ويتناقص هذا الكم بالنسبة للترددات الثانوية تدريجيا بمقدار بعدها عن التردد الأساس. وكلما زاد عدد الترددات الثانوية كلما قل نصيب التردد الأساس من الطاقة وزادت سرعة تلاشي صوت الشوكة. فإذا لم تكن الشوكة نقية المادة ومستقيمة التكوين فإننا لن نحصل منها على موجة جيبية وإنما موجة تتلاشى بسرعة نظرا لسرعة فقدانها للطاقة المسببة للذبذبات مما يؤدي إلى سرعة توقف الشوكة عن التذبذب ومن ثم انقطاع الصوت، وهذا ما يسمى خاصية الاضمحلال dampinhg. فإغلاق الباب بسرعة مثلا أو سقوط الكتاب على الطاولة أو تحطم الزجاج، كل هذه أصوات غير منتظمة ليس لها ذبذبات دورية لذا يصعب أن نعزو لها درجة محددة، ولذلك فهي صخب وأصوات ضجيجية مشوشة وعشوائية وليست نغمات. فلو ألقيت كتابا على الطاولة فسوف تسمع صوت سقوط الكتاب لحظة وقوعه ثم يضمحل الصوت ويختفي في نفس اللحظة. من المستحيل في هذا الصنف من الموجات أن نحدد درجتها أو حدتها لأن درجة النغمة، كما قلنا، تتوقف على تكرار ترددها بشكل منتظم (ليدفوجد ١٩٩٢: ٢٤).



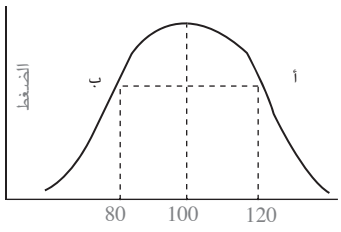
معدل سرعة الاضمحلال هو ما يحدد نوع النغمة، والنغمات من هذه الناحية صنفان: نغمة دورية periodic ونغمة غير دورية aperiodic. وما يحدد طبيعة هذه الموجات وشكلها هو المواد المختلفة الداخلة في تكوين مصدر الصوت لأن كل مادة في الطبيعة لها تردد فريد خاص بها. النغمة الدورية نغمة ثابتة تتكرر ذبذباتها بشكل منتظم repetitive. هذا النوع من النغمات لا يضمحل بسرعة. والموجات المضمحلة تسمى موجات غير دورية تتكون من موجة أساس وعدد كبير من الموجات الثانوية البسيطة التي تتداخل وتتفاعل مع بعضها البعض بحيث يؤثر شكل كل منها على شكل الأخرى لينتج عن ذلك موجة مركبة في غاية التعقيد. وبما أن الموجات غير الدورية لا تتكرر بشكل دوري وليس لها تردد أساس، حيث تكون طاقتها موزعة على كم كبير من الترددات غير المتوافقة، فإن الدرجة التي ندركها لها والتي هي ما يسمى التردد القاعدي basic frequency تعتمد على متوسط ترددات مكوناتها أو على تردد المكون الموجي الذي يحظى بأكبر اتساع. هذا على خلاف الموجة الدورية المركبة التي قلنا إن درجتها لا تعتمد على تردد مكونها الموجي الذي يحظى بأكبر اتساع وإنما على التردد الأساس للتكرار الذي يشكل الموجة (ليدفوجد ١٩٩٢: ٨٠؛ O'Conner 1973: 80-1).

من خلال الرسم الطيفي يتضح لنا مدى الفرق بين تكوين موجة دورية تتألف من موجات توافقية وبين موجة مضمحلة يدخل في تكوينها عدد لا متناهٍ من الترددات الثانوية غير التوافقية التي تتوزع على جانبي ترددها الأساس. ما يميز الموجة المضمحلة، إضافة إلى خلوها من الذبذبات الدورية، هو أن نظام الاتساعات فيها لا يتبع نمطا معينا. لذا لا يمكن في الصورة الطيفية لمثل هذه الموجة، على خلاف الموجة التوافقية، أن نمثل كل تردد من ترددا تها على شكل خطوط رأسية لأن ترددا تها لامتناهية وجميع الترددات داخلة في تكوينها مما يجعل من الصعب إبراز مكوناتها على شكل خطوط رأسية لأنها ستكون متلاصقة جدا ومتراكبة على بعضها بحيث لن نرى إلا سوادا بدلا من الخطوط. لذا فإنه ليس أمامنا في هذه الحالة إلا أن نلجأ إلى تمثيل الموجة المضمحلة على شكل منحنى طيفي spectrum curve يمثل ارتفاعه عند كل تردد الاتساع النسبي للمكون الموجي عند ذلك التردد، أي مقدار الطاقة التي تحظى بها الموجة القريبة من هذا التردد. هذا المنحنى الطيفي يأتي نتيجة توصلينا قمم الخطوط الممثلة لهذا الكم اللامتناهي من الترددات الثانوية المتقاربة على جانبي خط الموجة الأساس. وهكذا نستطيع الحكم على طبيعة الصوت من شكل المنحنى الطيفي الذي تختلف قممه وتعرجاته من صوت لآخر (Brosnaham & Malmberg 1970: 20).

حيث لا يمكن تعيين ترددات محددة على المنحنى الطيفي لموجة مضمحلة فإن اهتمامنا سوف ينصب على نطاق الترددات ذات القدر الأكبر من الطاقة. الترددات التي تقع ضمن هذا النطاق يتم تحديدها ابتداء من التردد الأساس حتى أقصى نقطة عن يمينه وأقصى نقطة عن شماله تكون قوتها تعادل نصف قوته، وتسمى هاتان النقطتان القصيّتان نقطتي منتصف القوة half power point. المسافة الأفقية المحصورة بين هاتين النقطتين على محوري التردد من اليمين إلى اليسار تمثل عرض الحزام bandwidth، أي عرض الترددات الجانبية المؤثرة على موجة النغمة المضمحلة والتي يزداد تأثيرها بزيادة درجة الاضمحلال، والمنحنى الواصل بين هاتين النقطتين يسمى منحنى الاضمحلال damping curve. الموجة غير التكرارية سريعة الاضمحلال يكون الانحدار من قمة منحنى طيفها متدرجا وعريضا لأن طاقتها تكون موزعة على مجال أوسع من الترددات الجانبية المؤثرة إلى اليمين وإلى اليسار من التردد المركزي والتي تحظى بكم لا بأس به من القوة على حساب التردد المركزي؛ وكلما زادت درجة اضمحلال النغمة كلما زاد عرض الحزام، أي عدد الترددات. هذه المسافة هي التي تحدد مدى تجاوب رنين الجسم قسريا لأي صوت خارجي ومجال الترددات التي يمكنه القيام بترشيحها وتمريرها (O'Conner 1973: 85-6). التردد الصادر عن الجسم عند اهتزازه اهتزازا حرا هو ذات التردد الذي يصدر عنه عند اهتزازه اهتزازا قسريا. أي أن التردد الرنيني لأي جسم هو ذات تردده الطبيعي ومنحناه الرنيني له نفس الشكل سواء كانت حركته حرة



المرنان الأعلى بطيء الاضمحلال لكنه لا يستجيب إلا لترددات قليلة أما المرنان الأسفل فهو سريع الاضمحلال لكنه يستجيب لترددات أكثر، وهذا ما تبينه منحنياتهما. الخط الرأسي في المنتصف في كلا المرنانين هو التردد الأساس والخطين إلى اليمين وإلى الشمال منه يمثلان نقطة منتصف القوة. والخط أ–ب في المرنان الأسفل يمثل عرض الحزام.



أو قسرية. ويسمى السلوك المتوقع للجسم الرنان منحنى البث transmission curve والترددات المحصورة في هذا المنحنى تشكل ما يسمى حزام التمرير pass band. والمنحنى الذي يبين طريقة اهتزاز المرنان لما يعترضه من تردد يسمى منحنى الرنين resonance curve. فالمنحنى الطيفي المدبب الذي يكون الانحدار يمينا وشمالا من قمته حادا يمثل ترددا رنينيا معدل اضمحلاله بطيء. أي أنه جسم تصدر عنه نغمات نقية وتتركز طاقة الرنين فيه عند منطقة ترددية ضيقة. أما إذا كان المنحنى متدرجا وعريضا فإن المرنان من النوع المضمحل الذي يستجيب لترددات أكثر. وكلما زادت درجة الاضمحلال اتسع عرض الحزام الذي يقوم بتمرير الترددات والاستجابة لمزيد من الترددات الجانبية التي تتجمع عن يمين وعن يسار تردده المركزي.

مما تقدم يتضح لنا أن الأجسام الرنانة التي يمكننا أن نستعملها كمُرشِّحات أنواع منها المضمحل ومنها غير المضمحل. المُرشِّحات غير المضمحلة تشبه الشوكة الرنانة التي لا تصدر إلا نغمة واحدة بسيطة ولذا فهي لا تستجيب إلا لنغمة مماثلة. وبالمقابل هناك مُرشِّحات مضمحلة تستجيب لعدد أكبر من الترددات لأنها هي نفسها يصدر عنها إضافة إلى ترددها المركزي ترددات أخرى جانبية ولذا فهي تستجيب كجسم رنان لترددها المركزى والترددات الأخرى التي يمكن أن تصدر عنها حينما تهتز اهتزازا حرا والواقعة بين نقطتي منتصف القوة.

> ومن الأهمية بمكان أن نقرر وجود نوعين من المرشحات –قياسا على وجود نوعين من الأجسام المستجيبة للرنين– الأول المرشح غير المضمحل undamped filter والثاني المرشح المضمحل damped filter. فكما أن الجسم الذي لا ينتج عند اهتزازه اهتزازا حرا إلا ترددا واحدا بسيطا لا يمكنه أن يستجيب بالرنين إلا لمثل هذا الترد– فكذلك إذا قام هذا الجسم بمهمة المرشح فسنجده لن يسمح إلا بتمرير هذا التردد متجاهلا كافة الترددات الأخرى. ومثل هذا المرشح يسمى المرشح غير المضمحل.
>
> أما الجسم الذي ينتج نغمة مضمحلة تتكون من تردد مركزي ومجموعة أخرى من الترددات الجانبية حول التردد المركزي فسنجده يستجيب بالرنين للتردد المركزي وللترددات الواقعة ما بين نقطتي منتصف القوة. وكذلك الأمر إذا قام مثل هذا الجسم بدور المرشح فإنه لن يسمح بتمرير التردد المركزي فقط بل بمجموعة الترددات الواقعة خلال عرض النطاق المحصور ما بين نقطتي منتصف القوة. مثل هذا المرشح نعده مرشحا مضمحلا. وكلما زادت درجة الاضمحلال في المرشح اتسع عرض نطاق تمرير الترددات واستجاب لعدد أكبر من الترددات الثانوية الجانبية المتجمعة حول تردده المركزي (مصلوح ٢٠٠٠: ٤٧).

النغمة الحنجرية: ترشيحها وتقويتها

لا يقتصر الرنين على الأجسام الصلبة، بل يمكن لكتلة هواء محبوسة في حيّزٍ ما أن تهتز وتعمل كجسم رنان. لنفترض أن لدينا أنبوب طويل في نهايته السفلى صنبور نستطيع بواسطته أن نتحكم في زيادة أو نقصان مقدار كمية الماء داخل الأنبوب وبالتالي حجم الفراغ في الأنبوب وحجم كتلة الهواء في هذا الفراغ. إذا ضبطنا طول عمود الهواء داخل الأنبوب بحيث يكون المعدل الطبيعي لاهتزازه مساويا لمعدل اهتزاز شوكة رنانة نطرقها ونضعها عند فوهة الأنبوب فسوف نحمل الهواء داخلها على الاهتزاز والرنين. ولكن لو كانت كمية الماء داخل الأنبوب أكثر أو أقل فلن نحصل على رنين، أو ربما نحصل على رنين باهت لو كانت كمية الماء قريبة من المعدل المطلوب. كتلة الهواء المحتجز في الأنبوب تتذبذب على عدد كبير من الترددات باتساعات مختلفة وأي من هذه الترددات سوف تستجيب بالرنين لأي مصدر صوتي خارجي يتوافق معها (Brosnaham & Malmberg 1970: 24-5). "وكما يحدث تماما في أمثلة الرنين الأخرى، سوف تعمل الحركات

الصغيرة التي تقوم بها الشوكة الرنانة كسلسلة من الضربات التي تنشأ عنها في النهاية تحركات كبيرة تقوم بها كتلة الهواء. وهذه التحركات سوف تسبب إثارة في الهواء المحيط وسوف تنتشر بطبيعة الحال متجهة إلى الخارج على هيئة موجات صوتية. . . . وأعمدة الهواء الرنانة ذات أهمية كبيرة من وجهة نظرنا وذلك لأن الفرق بين كثير من أصوات الكلام إنما يرجع إلى ما يعرض لكتلة الهواء الموجودة في الفم والقصبة الهوائية من تغيرات من حيث شكلها." (ليدفوجد ١٩٩٢: ٩٠).

وفعلا يمكننا اعتبار القناة الصوتية أنبوبا بداخله كتلة من الهواء المحبوس يمكن التحكم في حجمها وشكلها ودرجة كبسها بواسطة تغيير مواضع أعضاء النطق. وكأي أنبوب على هذا النحو يمكن اعتبار الهواء داخل القناة الصوتية جسما رنانا له العديد من الترددات الطبيعية التي تتجاوب مع ما يتوافق معها من الترددات الصادرة عن اهتزازات الأوتار الصوتية (Catford 1977: 17-9; Denes & Pinson 1973: 75-6). فحينما يمر الهواء الخارج من الرئتين أثناء عملية الزفير عبر القصبة الهوائية ليخترق الفراغ الذي يقع بين الوترين الصوتيين تهتز الأوتار اهتزاز حرا تستجيب له فراغات القناة الصوتية بالاهتزاز القسري من أقصى فجوة البلعوم إلى الحنجرة (صندوق الصوت) فالحلق (حيث تتصل القصبة الهوائية بالمريء) فالأنف أو الفم انتهاء بالأسنان والشفتين التي تتغير أشكالها وأحجامها حسب حركات أعضاء النطق المختلفة. أعضاء النطق بمرونتها وقدرتها العجيبة على اتخاذ أشكال وهيئات مختلفة وبسرعة فائقة ما هي إلا وسيلة فعالة للتحكم بقوة ضغط وترددات الهواء الخارج من الرئتين وتحقيق الصوت من خلال حبس النفس أو تضييق مجراه أو فتحه كليا ابتداء من الأوتار الصوتية ومنها إلى اللهاة واللسان والشفتين والحنك والأسنان مما يؤدي إلى ضغط أو خلخلة الهواء داخلها لتعطي أصواتا مختلفة في ترددتها ومداها وقوتها. بواسطة تحريك أعضاء النطق تتحوّر تجويفات القناة الصوتية لتتحول إلى حجر رنينية مضمحلة ومرشحات بأشكال وأحجام مختلفة تعمل بنفس الطريقة التي وضحناها أعلاه، حيث تقوم بتقوية بعض الترددات وإضعاف الأخرى في النغمة الحنجرية المركبة المستولدة من اهتزاز الأوتار الصوتية والتي تتألف من كم كبير من الموجات البسيطة ولكنها ضعيفة بحكم توزيع الطاقة بينها. إنها عمليات أشبه ما تكون بتحريك ذراع الساكسافون أو تحريك الأصابع على ثقوب الناي.

يصدر عن اهتزاز الوترين الصوتين إطلاق نفثات من الهواء على شكل نبضات قوية متتابعة وبسرعة عالية قد تبلغ المئات في الثانية الواحدة وينتج عن ذلك ما يسمى بالنغمة الحنجرية التي تتميز بتركيبها المعقد وانطوائها على كم كبير جدا من الترددات المتوافقة مع ترددها الأساس الذي يمثل التردد الطبيعي للأوتار الصوتية. ما يحدد شكل هذه الترددات من حيث القوة والحدة هو طبيعة الوقف أو التضييق الحادث في فراغ المزمار الواقع بين الوترين الصوتيين، إضافة إلى سماكة الأوتار ودرجة الشد. هذا الكم الكبير من توافقيات النغمة الحنجرية يعني أنه سوف يكون لها تأثير واضح على أي مرشح أو مرنان يعترض طريقها. أي أن توافقياتها من الكثرة والتنوع بحيث أن عددا كبيرا منها سوف يتوافق مع الترددات الطبيعية لحجرة الرنين التي تتشكل في فراغات القناة الصوتية –مهما كان الحجم والشكل اللذين تتخذهما هذه القناة– وبالتالي تستجيب لها الفراغات بالاهتزاز القسري وتقوم بترشيحها وإعادة توزيع القوة عليها حينما يتوافق التردد الطبيعي للنغمة مع التردد الرنيني للفراغات بحيث تتم تقوية بعض الترددات وإغفال البقية، تماما كما تفعل صناديق الآلات الموسيقية مع اهتزازات أوتارها، أو كما يحدث عند النفخ في قوارير فارغة مختلفة الأطوال

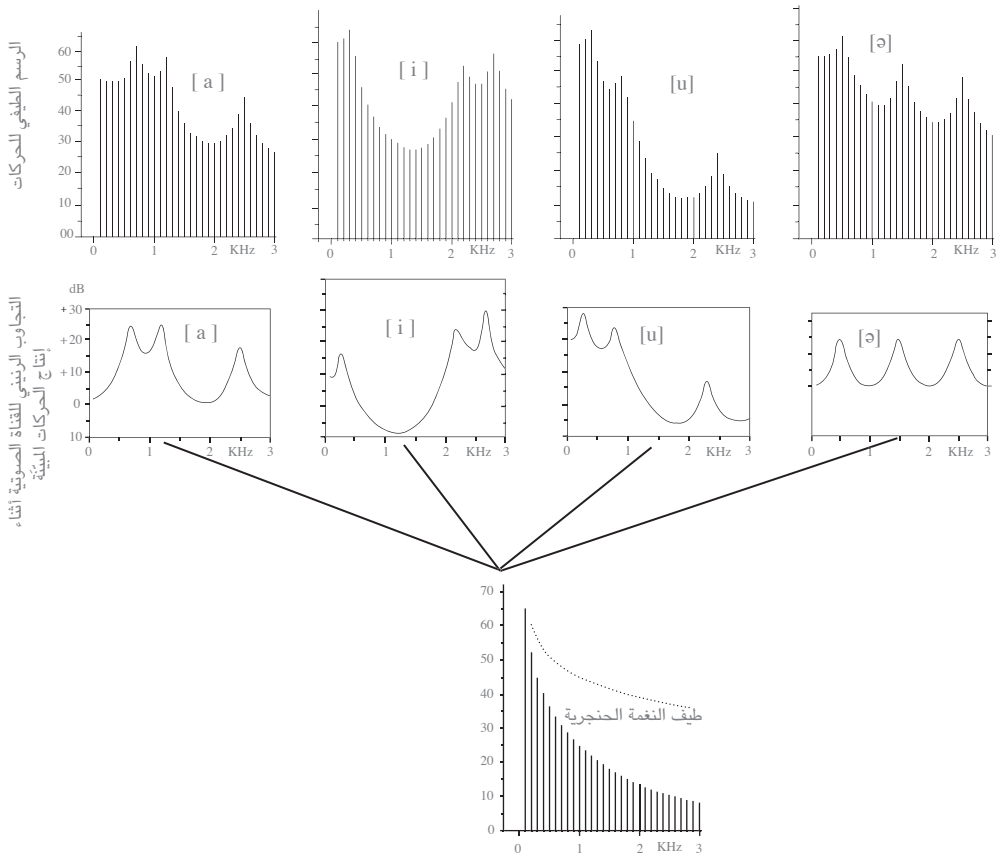
والاتساعات وحجم فتحات النفخ. باختصار، النغمة الحنجرية هي المصدر الوحيد للنغمة في الكلام وترددها الأساس هو الذي يحدد درجة الصوت، وهي نغمة مركبة ذبذباتها دورية ومكوناتها توافقية تتكون من نغمة أساس ومضاعفات لها. وتتحدد عملية الرنين في الحركات والأصوات المجهورة تبعا لخواص هذه النغمة الحنجرية ومن خواص الحجر الرنانة التي تتشكل في الممر الصوتي. وتعمل هذه الحجر الرنينية، بحسب عوامل الترشيح والتقوية والرنين والاضمحلال، على إعادة توزيع القوة على العدد الضخم من توافقيات النغمة الحنجرية لتقوية بعضها وطمس البعض الآخر خلال عبورها فراغات القناة الصوتية، ويحدث هذا كنتيجة لاتفاق تردد الرنين في الفراغات مع بعض الترددات الطبيعية المكونة للنغمة الحنجرية.

ونظرا لمرونة الهواء فإنه يمكن تحريكه ودفعه إلى الخارج بفعل النقرات القوية المتسارعة الناتجة عن النغمة الحنجرية أثناء اهتزاز الأوتار الصوتية. وتحدث عملية التقوية والرنين إذا كان معدل تضاغط الهواء وتخلخله داخل القناة الصوتية معادلا لتردد النغمة الحنجرية، أي إذا كان معدل تضاغطات تردد الموجة وتخلخلاتها مساويا للتردد الطبيعي للقناة الصوتية وإذا تزامن وصول لحظة التخلخل في موجة النغمة مع اندفاع كتلة الهواء المحبوس إلى الخارج. هذا يؤدي إلى اتساع ذبذبات النغمة الحنجرية التي يضاف لها الاتساع الناجم عن ضغط الكتلة الهوائية المندفعة إلى الخارج، أو بعبارة أخرى إضافة اتساع تردد الرنين إلى اتساع اهتزاز التردد الطبيعي للنغمة الحنجرية. ويمكننا توضيح المسألة وإن بقدر غير قليل من التبسيط. لنفترض أن القناة الصوتية فراغا أنبوبيا يبلغ طوله حوالي ١٧,٥ سنتيمترا وقطره حوالي ٢,٥ سنتيمترا، وهذا الأنبوب مغلق من أحد طرفيه الواقع أسفل الحنجرة ومفتوحا من الطرف الآخر عند الشفتين. والقاعدة تقول إن أقل تردد يمكن أن يصدر عن أنبوب بهذه المقاسات يعادل تردد موجة صوتية طولها أربعة أمثال طول الأنبوب وتقع الترددات التالية لها على مسافات منتظمة أحدها من الأخرى قيمها مضاعفات فردية للتردد الأقل. فلو كان مقدار التردد الأقل ٥٠٠ ذ/ث فإن التي تليها ستكون٥٠٠×٣=١٥٠٠ والتي بعدها تساوي ٥٠٠×٥=٢٥٠٠، وهكذا؛ أي مضاعفات فردية للتردد الأول (Pickett 1980: 19-24, 41-8, 61).

تذبذب الأوتار الصوتية يحيل الطاقة الحركية لهواء الزفير إلى طاقة صوتية، وأعضاء النطق تحيل هذه الطاقة الصوتية إلى أصوات كلامية. اهتزازات الوترين الصوتين بدون رنين وتقوية القناة الصوتية لها ليست كافية في حد ذاتها لإطلاق الاهتزازات التي نسمعها كأصوات. من خلال خاصية الرنين والترشيح تعمل الممرات الصوتية كمرشحات ومقويات للموجات الصوتية المركبة التي تصدر عند اندفاع الهواء خلالها. ويحدث هذا كنتيجة لاتفاق تردد الرنين في الفراغ مع عدد من الترددات الطبيعية المكونة لنغمة الحنجرة، وذلك لما تتمتع به هذه الفراغات –وبخاصة فراغ الفم– من قدرة كبيرة على التغير في الشكل والحجم. ولذا تختلف الأصوات اللغوية تبعا لاختلاف شكل هذه الحجر الرنينية أثناء إنتاج الصوت لتعمل كمرشحات تمارس أثرها الرنيني المطلوب على النغمات الحنجرية لتتشكل منها الأصوات المطلوبة. ويلعب اللسان دورا أساسيا في تكييف هذه الحجر الرنينية بحركاته السريعة والمرنة جدا، إضافة إلى الحنجرة التي بإمكانها أن تتحرك إلى الأعلى وإلى الأسفل.

> ونحن نعلم أن فراغات النطق لها قدرة كبيرة ومستمرة على التشكل والتنوع. ومعنى ذلك أن ترددها الرنيني ليس ثابتا ولكنه في تغير دائم وبالتالي ستستجيب بالرنين والتقوية –والترشيح أيضا– استجابات متلاحقة لمجموعات مختلفة ومتنوعة من النغمات التوافقية المكونة للنغمة الحنجرية طوال فترة التصويت. ويقتضي ذلك اختلاف الأثر السمعي الناتج تبعا لتشكيل الفراغات وتنوعها (مصلوح ٢٠٠٠: ٢٢٦).

أي أن اختلاف الأثر السمعي ليس مرده إلى أي تغير يحدث على النغمة الحنجرية نفسها لحظة صدورها من الحنجرة. الصوت الصادر من الأوتار الصوتية معدله ثابت، فلا تتغير سعته ولا ترداته من صوت إلى آخر، لكن ما يتغير هو شكل القناة الصوتية خلال تحقيق الأصوات المختلفة مما يغير من خصائصها الرنينية والترشيحية ومنحنيات التمرير. أي أنه لا يحدث التغيير إلا من خلال عبور النغمة الحنجرية فراغات القناة الصوتية وتعرضها للترشيح والتقوية اللتين يحدد طبيعتهما شكل القناة الصوتية وحجمها وسعة أو ضيق الفتحات التي تعترض النغمة الحنجرية ويتم تكييفها بتقارب أو تباعد أعضاء النطق أحدها عن الآخر مثل الحنجرة واللسان وهل ترتفع اللهاة لتسد مجرى الأنف أم تتدلى لتتركه مفتوحا جزئيا أو بالكامل. كما يمكننا التحكم في تجاويف الفم من خلال تحريك الشفتين والخدين. فلو أننا مثلا اقتلعنا زمارة المزمار ونفخنا فيها فإنها لن تصدر إلا نغمة مركبة واحدة لا غير لكنها تحتوي على كم كبير من الترددات. التغيير الوحيد الممكن في هذه الحالة هو النفخ بقوة أشد لتوسيع الترددات مما يعطي صوتا أعلى للترددات لكن كيفية النغمة ذاتها لن تتغير. أما لو أعدنا الزمارة إلى موقعها في قصبة المزمار وبدأنا بالنفخ وقمنا بمخالفة



لاحظ كيف تمر نفس النغمة الحنجرية، كما يتبين من طيفها، عبر القناة الصوتية، التي تتخذ أشكالا وأحجاما مختلفة لإنتاج الحركات المبينة أعلاه والتي تختلف أطيافها عن بعضها البعض وعن النغمة الحنجرية التي هي مصدرها الأصلي

الأصابع على الثقوب وراوحنا بين فتحها وغلقها فإننا بهذه الطريقة سنحصل على أي نغمة نريد لأن فتح الثقوب وغلقها يعني التحكم في طول عمود الهواء المهتز داخل القصبة. وعمود الهواء هذا هو عبارة عن جسم رنان ومرشِّح في نفس الوقت وكلما تغير طوله كلما تغير منحنى تردده، أو بمعنى آخر منحنى تجاوبه مع النغمات المنبثقة من الزمارة فيقوم بترشيح وتقوية ما يتوافق منها تحديدا مع تردده الأساسي في أي من هذه الأطوال المختلفة. الاختلاف في حالة الكلام أننا نغير من مواقع أعضاء النطق بدل الأصابع.

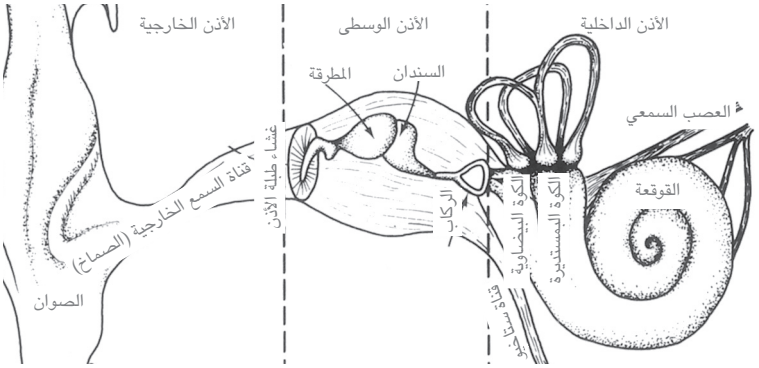
فسيولوجيا السمع

قدم الأستاذ سعد مصلوح في كتابه **دراسة السمع والكلام** (مصلوح ٢٠٠٠: ٢٨٢–٣٢٨) تفصيلا وافيا ودقيقا عن تشريح الأذن بمختلف أجزائها ووضيفة كل جزء. تبدأ المرحلة السمعية بإحداث ترددات في طبلة الأذن تتوافق مع الموجات الصوتية التي تصل إليها ومن ثم تنقلها عبر ممرات متعرجة إلى الدماغ. تتألف الأذن من ثلاثة أجزاء: الأذن الخارجية والأذن الوسطى والأذن الداخلية. الأذن الخارجية تتألف من الصيوان، وهو ذلك الجزء البارز على جانبي الرأس الذي يقوم بمهمة تحديد اتجاه مصدر الصوت وتجميع الموجات الصوتية لتمر عبر القناة السمعية (الصمّاخ) التي هي جزء من الأذن الخارجية طولها حوالي البوصة تقريبا مهمتها توصيل هذه الموجات، بعد ترشيحها وتضخيم الموجات الصوتية عند الترددات القريبة من ترددات الطبيعية، إلى طبلة الأذن. كما أن الشعيرات والمادة الشمعية التي تفرزها غدد هذه القناة تساعد على وقاية الأجزاء الداخلية من الأذن وحمايتها من مؤثرات البيئة الخارجية. وتتكون طبلة الأذن من ثلاث طبقات إلا أن سمكها جميعا لا يتعدى ٠,١ ملم. والطبلة بالغة الحساسية للاهتزازات وتصدر عنها ترددات متطابقة تماما مع الترددات الصادرة عن الجسم المهتز الذي هو مصدر الصوت. وتنقل الطبلة هذه الاهتزازات بأمانة تامة إلى عظيمات الأذن الوسطى التي تقوم هي أيضا بمحاكاة اهتزازات الطبلة (Reetz & Jongman 2009: 227-41).

وقبل الحديث عن الوظيفة السمعية للأذن الوسطى يجدر التنبيه إلى أن قاعدتها ترتبط بقناة سْتاخيان Eustachian tube التي تصل بين تجويف الأذن الوسطى وبين تجويف الحلق الأنفي وتعمل بذلك على تحقيق توازن الضغط على جانبي غشاء طبلة الأذن عن طريق تعادل ضغط الهواء المندفع إليها من الخارج مع ضغط الهواء المندفع إلى الأذن الوسطى من الفم والأنف. هذا التعادل بين الضغط الداخلي والضغط الخارجي يمكّن غشاء الطبلة أن يستجيب للموجات الصوتية والاهتزازات التي ترد إليها من الخارج. ويلاحظ أن اختلال الضغط يؤثر على كفاءة السمع إما بدفع الطبلة إلى الخارج وعدم قدرتها على التذبذب إلى الداخل أو العكس كما يحدث عند الغطس في أعماق الماء أو التحليق في الطائرة، وعادة ما يساعد العلك أو التثاؤب في حل المشكلة عن طريق فتح القناة لإدخال الهواء من الحلق إلى الأذن. كما تجدر الإشارة إلى أن الأذن الداخلية تحتوي كذلك في القسم العلوي منها على آلية تسمى vestibular mechanism تتكون من أقنية نصف دائرية تعرف بالقنوات الهلالية semicircular canals مهمتها حفظ توازن الرأس والجسم عند الإنسان (Brosnahan *et al* 1970: 162).

الأذن الوسطى عبارة عن تجويف هوائي مغروس في عظام الصدغين على جانبي الجمجمة ويحتوي على سلسلة من ثلاث عظيمات غضروفية مستدقة ossicles وهي على التوالي المطرقة malleus التي تتصل يدها بالطبلة ورأسها متصل بأعلى العظيمة التالية التي تسمى السندان incus الذي يتصل طرفه السفلي

من الجهة المقابلة بعظيمة الركاب stapes الذي بدوره مربوط بالكوة البيضاوية oval window التي تشكل المدخل إلى الأذن الداخلية. هذه العظيمات تشكل وصلة آلية بين الأذن الخارجية والأذن الداخلية وتعمل بطريقة الروافع بحيث أن حركة أي منهما تحرك الآخر وكلها تتدلى في تجويف الأذن الوسطى بواسطة أربطة غضروفية مرنة تمكنها من الاهتزاز والحركة والاحتفاظ بتوازنها في وضعها الطبيعي مهما كان وضع الرأس والجسم. بهذه الطريقة تعمل آليات الأذن الوسطى على زيادة كمية الطاقة الأَكُستيكية التي تنقلها من طبلة الأذن إلى الأذن الداخلية ورفع كفاءة جهاز السمع بزيادة الضغوط الواقعة على الكوة البيضاوية، فإذا تذبذب غشاء طبلة الأذن حرك يد المطرقة فنقرت نقرات خفيفة على السندان فنقر السندان على الركاب الذي ينقل هذه النقرات إلى الكوة البيضاوية. وحيث أنه عند كل محور ارتكاز بين القوة والمقاومة يكون ذراع القوة أكبر من ذراع المقاومة تكون القوة الناتجة عن عظيم الركاب أكبر من القوة الأصلية المحركة للمطرقة بأكثر من ٢٠ ضعفا. كما أن قابلية هذه العظيمات الغضروفية للتمدد والتقلص تساعد على امتصاص حدة بعض الموجات الصوتية قبل وصولها للأذن الداخلية. وهكذا تقوم هذه العظيمات بتكبير الذبذبات الصوتية وتحويلها من اهتزازات هوائية ونقلها إلى الأذن الداخلية على شكل اهتزازات آلية ذلك لأن الأذن الداخلية عبارة عن تجويف مغروس في عظام الصدغين ومكون من أغشية دقيقة وتركيبات معقدة bony labyrinth مملوء بالبلغم المحيطي perilymph الذي تحيط به أغشية تسمى الأغشية التيهية membranous labyrinth مملوءة أيضا بسائل لزج يسمى سائل التيه الغشائي endolymph. هذا يعني أن ضغط التذبذات الهوائية سوف يصطدم بضغط ومقاومة هذا السائل الداخلي المحجوز في هذه التجويفات ولن يؤثر فيه ويستجيب له ما لم يتحول إلى اهتزازات ميكانيكية تحرك السائل. وأهم جزء في الأذن الداخلية هي القوقعة cochlea التي يبلغ طولها حوالي ٣٥ مم ويتضح من اسمها أنها غضروف حلزوني ملتف حوالي ثلاث التفافات على نفسه. هذه القوقعة هي التي تحتوي على سائل التيه الغشائي الذي يهتز تبعا لتذبذبات الطبلة وتتدلى فيه أهداب الشعيرات النهائية للأعصاب السمعية التي تنقل اهتزازات السائل إلى عضو كورتي Corti المغمور بهذا السائل الغشائي الموجود في قناة القوقعة الوسطى وبذلك يتحول الصوت من إشارات ميكانيكية إلى نبضات كهربائية ينقلها العصب السمعي عبر نقاط اشتباك synapses الألياف العصبية إلى منطقة الإدراك السمعي وبذلك تنتقل الرسالة اللغوية إلى مركز فك الشفرة اللغوية في الفص الصدغي من لحاء المخ. ويمكن للشعرة



السمعية أو الخلية العصبية الواحدة نقل ١٠٠ إشارة في الثانية، أو ما مجموعه أكثر من ٣٠,٠٠٠,٠٠٠ إشارة كهربائية في الثانية لكل الخلايا والشعيرات المغموسة في عضو الكورتي (مالمبرج ١٩٨٥: ٣٧–٤١، مصلوح ٢٠٠٠: ٢٤٣–٧٢؛ Heffner 1969: 53-7). ويتم تحويل الإشارات الميكانيكية إلى نبضات كهربائية في أي جزء من جسم الإنسان عند وجود المحفّز الكافي الذي يقلب التوازن الأيوني الكيميائي عند السطح الخارجي والسطح الداخلي للخلايا العصبية مما يولد شحنة كهربائية تنتشر على طول المحور العصبي (Denes & Pinson 1973: 123-30).

بهذه الطريقة تنتقل الرسالة اللغوية من مرحلة الإرسال التي تبدأ من تأليف عناصر لغوية يؤلف المرسل فيما بينها ليبني منها رسالته اللغوية إلى مرحلة الاستقبال التي يحاول فيها المستقبل فك هذه الرسالة وتحليلها إلى العناصر الأولية التي تتألف منها. ويمكننا أن نختصر هذه السلسة الكلامية ببعديها المتعاكسين على النحو التالي:

المستوى الإدراكي > المستوى الفسيولوجي > المستوى الفيزيائي > المستوى الفسيولوجي > المستوى الإدراكي.

كما يمكننا تصور السلسة الكلامية بتفصيل أكثر على النحو التالي:

مركز التشفير اللغوي > مركز التحكم العصبي > جهاز النطق > الفضاء الخارجي > جهاز السمع > مركز التحكم العصبي > مركز فك الشفرة.